

Schnellläuferstrategien in Lagern und Dynamische Zonierung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

von der Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden
genehmigte

Dissertation

von

Michael Glass

aus Schwarzheide

geb. am 27.05.1974

Tag der Einreichung: 13.03.2008

Tag der mündlichen Prüfung: 19.12.2008

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. H.-G. Marquardt

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. K. Furmans

3. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Bruns

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. R. Stelzer

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	7
1.1. Ursachen für Lager	7
1.2. Lageraufgaben	9
1.3. Begriffe und Sprachregelungen	12
2. Sortimente, Disposition und Bestände	15
2.1. Sortimente	15
2.2. Dispositionsverfahren	15
2.2.1. Einfache Nachschubstrategien	15
2.2.2. Grundmodell der optimalen Bestellmenge	16
2.3. Bestandsverläufe	18
3. Lagerstrategien und Lagerdimensionierung	21
3.1. Lagerdimensionierung	21
3.1.1. Bestimmung der Lagerkapazität	22
3.1.2. Bestimmung der notwendigen Lagerleistung	23
3.2. Belegungsstrategien	23
3.3. Probleme der Lagerplanung	27
4. Schnellläuferstrategien	29
4.1. Mittlere Fahrzeit und Spielzeit	29
4.2. Fahrzeitverteilung	31
4.2.1. Allgemeine Darstellung	31
4.2.2. Fahrzeiten in Regallagern	32
4.2.3. Erweiterte Fahrzeitdefinition	33
4.3. Fachzugriffshäufigkeit	35
4.3.1. Entstehung	35
4.3.2. Verweildauerverteilung	37
4.4. Literatur	38
4.4.1. Einleitung	38
4.4.2. Etablierung des CPO-Kriteriums	40
4.4.3. Umsetzung des CPO-Kriteriums	41
4.4.3.1. Grundlagen	41
4.4.3.2. Wechselwirkungen mit der benötigten Lagerkapazität	42
4.4.3.3. Zonenbildung und Bewertung des Optimierungspotentials	42
4.4.3.4. Mehrfachlastaufnahmemittel und mehrfachtiefe Lagerung	43

4.4.3.5.	Andere Zonenbildungen	44
4.4.4.	Zusammenfassung	45
4.5.	Systematik	46
4.5.1.	Klassifikationsmerkmale	46
4.5.2.	Zonenanzahl $I - \infty$	47
4.5.3.	Exklusivität der Zonen – <i>Dedicated</i> oder <i>Shared</i>	47
4.5.4.	Bezugsgröße der Verweildauer – <i>Article</i> oder <i>Stockkeeping Unit</i>	48
4.5.5.	Stellplatz innerhalb einer Zone – <i>Uniform</i> oder <i>Shortest-Travel-Time</i> . .	48
4.5.6.	Weitere Kriterien	49
5.	Dynamische Zonierung	51
5.1.	Motivation	51
5.2.	Lagereinheitsbezogene vs. artikelbezogene Verweildauern	52
5.2.1.	Unterschiedliche Verweildauern der Lagereinheiten eines Artikels . .	52
5.2.2.	Die Strategie ADAPTIVE von Goetschalckx und Ratliff	54
5.3.	Die Strategie DYN	57
5.3.1.	Bestimmung des Verweildauerquantils	58
5.3.2.	Bestimmung des Lagerortes	61
5.4.	Analytische Leistungsbestimmung	68
5.4.1.	Modellannahmen	68
5.4.2.	Artikelbezogene Betrachtung	70
5.4.3.	Lagereinheitsbezogene Betrachtung	72
5.4.3.1.	Verweildauer und gelagerte Menge	72
5.4.3.2.	Identische Artikel	74
5.4.3.3.	Realistische Sortimente	76
5.5.	Simulationsergebnisse	80
5.5.1.	Lagerverwaltungssimulation mit WMSim	80
5.5.2.	Modell	82
5.5.2.1.	Sortiment	82
5.5.2.2.	Strategien	83
5.5.2.3.	Simulationsläufe	84
5.5.3.	Statische Sortimente	85
5.5.3.1.	Lagerfüllgrad	85
5.5.3.2.	Ungleichverteilung des Sortiments	86
5.5.3.3.	Lagereinheitsbasierte vs. artikelbasierte Verweildauer	87
5.5.3.4.	Gleichverteilungsstrategie vs. Kürzeste-Fahrzeit-Strategie .	88
5.5.4.	Dynamische Sortimente	90
5.5.4.1.	Konfiguration	90
5.5.4.2.	Ergebnisse	92
5.6.	Zusammenfassung	93
6.	Verweildauerprognose	95
6.1.	Einleitung	95
6.2.	Bedarfsprognose statt Verweildauerprognose	95

6.3.	Verweildauerberechnung	97
6.3.1.	Staulager	97
6.3.2.	Zerreißlager	99
6.4.	Praxiseinsatz	100
6.4.1.	Steuerungsebenen	100
6.4.2.	Artikelklassen	102
6.4.3.	Prognoseanforderungen	105
6.4.4.	Umsetzung – Ein Vorschlag	108
6.4.4.1.	Bewertung	108
6.4.4.2.	Datenerhebung	109
6.4.4.3.	Klassifizierung	109
6.4.4.4.	Prognose	110
6.4.4.5.	Initialisierung und externe Einflussnahme	111
6.5.	Einfluss des Prognosefehlers	111
7.	Zusammenfassung und Ausblick	115
7.1.	Fazit	115
7.2.	Erkenntnisse	116
7.3.	Offene Fragen	117
	Abkürzungsverzeichnis	119
A.	Betaverteilungen	129

1. Einleitung

Über 90% der operativ tätigen Logistikunternehmen benennen Lager als wichtigste Sachanlage [BT02, S. 75]. Angesichts der beträchtlichen Investitions- und Betriebskosten ist die effiziente Nutzung dieser Ressource entscheidend für den Unternehmenserfolg. Diese Arbeit leistet dazu einen Beitrag.

Das Ziel der Forschungen war, die Lagergrenzleistung ohne Beeinflussung der technischen Parameter zu erhöhen. Dazu wird eine neue Schnellläuferstrategie vorgestellt. Herkömmliche Schnellläuferstrategien gehen auf die Effekte der Produktions- bzw. Bestellplanung sowie der Dispositionsregeln nur unzureichend ein, wobei erhebliches Optimierungspotential ungenutzt bleibt. Dieses Optimierungspotential wird aufgezeigt und erschlossen werden. Im Zuge der vergleichenden Untersuchung von Schnellläuferstrategien wird auch der Versuch unternommen, die Theorie zu Schnellläuferstrategien zu ordnen.

Deshalb beginnt das erste Kapitel damit, Gründe für Lager und Lagerbestände zu erläutern. Im zweiten Kapitel wird darauf eingegangen, wie sich diese Lagerbestände aus Sortimenten ergeben. Dazu wird über die Dispositionsregeln ein Zusammenhang zu den Beständen und Bestandsverläufen einzelner Artikel hergestellt und auf den Gesamtbestand geschlossen. Das dritte Kapitel befasst sich mit den Lagerstrategien und der Lagerdimensionierung. Die Auswirkungen der im zweiten Kapitel dargestellten Zusammenhänge auf die konkrete Lagergestaltung werden veranschaulicht. Kapitel 4 spezialisiert diese Ausführungen für Gestaltung und Leistungsfähigkeit der Schnellläuferstrategien. Kapitel 5 stellt eine neuartige Schnellläuferstrategie vor und vergleicht deren Leistungsfähigkeit und Eigenschaften mit herkömmlichen Strategien. Letztlich werden im sechsten Kapitel Möglichkeiten und Einschränkungen der technischen Umsetzung, insbesondere der Verweildauerprognose aufgezeigt.

1.1. Ursachen für Lager

Wirtschaftssysteme sind Systeme zur Erbringung von wirtschaftlichen Leistungen, also Produkten und Dienstleistungen. Die Prozesse in diesen Systemen können als Folge von verknüpften Subprozessen aufgefasst werden. Je nach Umfang bzw. Detailliertheit der Betrachtung des Systems sind in den unterschiedlichen Abstraktionsebenen ähnliche Strukturen vorzufinden. In Abbildung 1.1 sind verschiedene Lager dargestellt, welche Güter in ihrem Erstellungsprozess durchlaufen können. Die Darstellung beinhaltet Lager in drei verschiedenen Abstraktionsebenen:

- Unternehmensübergreifend (Speditions- und Gebietslager)
- Lager auf Unternehmensebene (Warenein- und -ausgangs-, sowie Zwischenlager)
- Bereichsinterne Lager (Produktionslager).

1. Einleitung

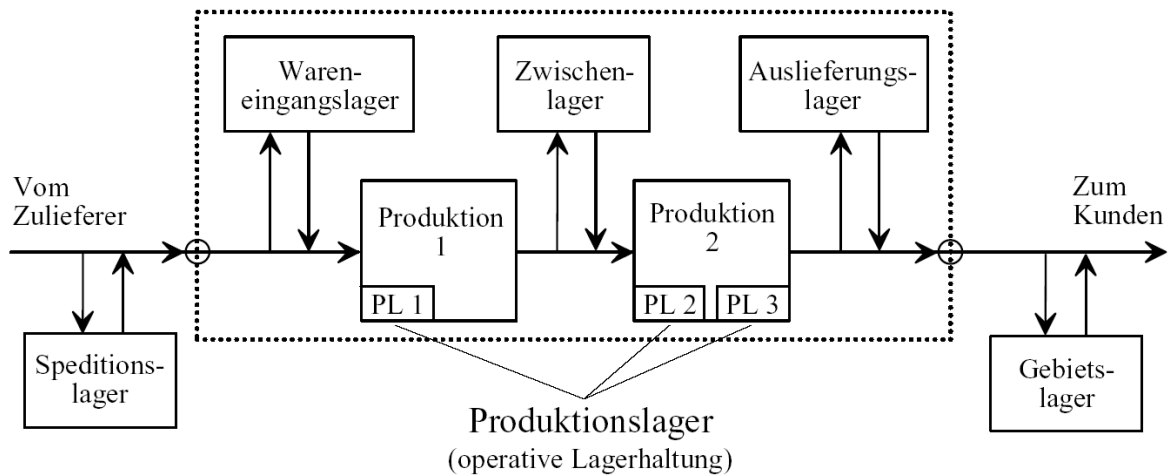


Abbildung 1.1.: Lager im Wirtschaftsprozess nach ARNOLD und FURMANS [AF04, S. 180]

Die aufgeführten, verschiedenen Lager sollten als logische Einheiten verstanden werden. Ihre technische Umsetzung kann durchaus in ein und demselben Hochregallager bestehen.

An bzw. mit den Gütern wird während ihrer Erstellung und Distribution eine Vielzahl von Einzeloperationen vorgenommen, durch deren Abfolge sie ihren Zustand und Ort verändern. Anfang und Ende dieser Kette von Operationen sind äußerst schwer abzugrenzen und definitionsabhängig. Tatsächlich erstreckt sich diese Kette über den gesamten Lebenszyklus der Güter. Wirtschaftsprozesse bestehen so aus einer Vielzahl miteinander verknüpfter Einzeloperationen.

Lager vollständig zu vermeiden hieße, aufeinander folgende Einzeloperationen in diesen Prozessen zeitlich perfekt aufeinander abzustimmen. Nur wenn der Endzeitpunkt einer Operation n mit dem Anfangszeitpunkt der folgenden Operation zusammenfällt, entsteht an dieser Schnittstelle kein (Fehl-)Bestand¹. In realen Wirtschaftsprozessen ist eine solche Abstimmung praktisch unmöglich vollständig zu erreichen. Deshalb sind Wirtschaftsprozesse mit materiellen Gütern ohne Lager undenkbar.

In gleicher Weise trifft das auch auf rein informationelle Prozesse zu. Deren Lager heißen als logische Einheiten Gedächtnis, Stack und Heap, Text, Tabelle usw. Physische Entsprechungen wären Gehirn, Hauptspeicher oder Buch. Der substantielle (*sic*) Unterschied zu Prozessen mit materiellen Gütern besteht darin, dass Information im Gegensatz zu materiellen Gütern rückstandsfrei „verschwinden“ kann.

Wesentliche Einflussfaktoren auf die Prozesse, wie z. B. die Marktnachfrage, haben teils zufälligen Charakter. Aber auch durchgehend automatisierte Prozesse entziehen sich der vollständigen Beherrschbarkeit durch ungeplante Ausfälle verschiedenster Ressourcen oder auftrags- und auftragsreihenfolgeabhängige bzw. stochastische Prozesszeiten. Bestände sind deshalb unvermeidlich. Selbst wenn die zeitliche Abstimmung der Prozesse möglich erscheint, ist sie meist nicht wirtschaftlich sinnvoll. Die Kosten der perfekten Synchronisation der Prozesse

¹Fehlbestände verursachen erhebliche Kosten und werden durch das Vorhalten von Beständen vermieden. Dies wird auch als „Sicherstellung einer hohen Auslastung“ umschrieben.

übersteigen dann die Kosten der Lagerung. Das Supply-Chain-Management zielt darauf ab, die Synchronisation der Prozesse zu verbessern und damit die Notwendigkeit kostenintensiver Lagerung zu vermindern.

Bestände materieller Güter müssen physisch durch geeignete Einrichtungen aufgenommen werden. Diese Einrichtungen werden als Lager bezeichnet. Die zentrale Aufgabe von Lagern ist somit die möglichst kostengünstige Bereitstellung von Warteraum zur Aufnahme von Beständen.

1.2. Lageraufgaben

Lageraufgaben sind in der Literatur wiederholt benannt worden. Beispielhaft seien hier einige dieser Auflistungen dargestellt. APPELT und KRAMPE nennen (s. [AK85, S. 14 ff.] und [AK90, S. 463 ff.]):

- A1. Überbrückungsaufgabe,
- A2. Sicherheitsaufgabe,
- A3. Anpassungs- und Umformungsaufgabe,
- A4. Bereitstellungsaufgabe,
- A5. Pflegeaufgabe,
- A6. Kontrollaufgabe,
- A7. Transport- und Umschlagsaufgabe,
- A8. Steuerungsaufgabe.

Laut ARNOLD besteht die Aufgabe von Lagern primär darin [Arn97, S. 137],

- B1. großen Warteraum zwecks Prozessentkopplung

bereitzustellen. Weiterhin werden noch

- B2. Sammeln,
- B3. Verteilen,
- B4. Reihenfolgebestimmung und
- B5. Kommissionierung

genannt. JÜNEMANN und SCHMIDT nennen als Lageraufgaben [JS99, S. 41 ff.]:

- C1. Ausgleich unregelmäßiger Zu- und Abgänge,

1. Einleitung

- C2. Mengenausgleich,
- C3. Sicherstellung der Auslastung,
- C4. Nutzung kostenoptimaler Bestellmengen,
- C5. Abfederung saisonaler Schwankungen im Absatzverhalten,
- C6. Schaffung eines hohen Lieferservice,
- C7. Spekulation,
- C8. Zusatzaufgaben z.B. Bereitstellung.

Laut WÖHE haben Lager [Wöh90]:

- D1. Ausgleichsfunktion (Zeit- und Mengen),
- D2. Sicherungsfunktion,
- D3. spekulative Gründe,
- D4. Prozessfunktion (Produktivlager).

Diese Form der Darstellung von Lageraufgaben ist nur bedingt hilfreich. Problematisch ist bereits die mangelnde Differenzierung des Begriffes *Lageraufgaben*. Dabei kann sich dieser einerseits auf Lager als technische Einrichtung und andererseits auf Lagern als technologischen Vorgang beziehen.

Wie Lageraufgaben wahrgenommen werden, hängt entscheidend davon ab, aus welchem Blickwinkel Lager betrachtet werden. Meist ergibt sich schon aus dem Kontext der entsprechenden Literatur, dass eine der möglichen Sichtweisen vorherrschend ist und Lageraufgaben aus anderer Sicht bestenfalls am Rande erwähnt werden. Oft werden in den Auflistungen von Lageraufgaben verschiedene Sichtweisen vermischt. Die möglichen Sichtweisen sind die

Bedientheoretische Sicht Eine Vielzahl der Nennungen von Lageraufgaben läuft auf die Entkopplung aufeinanderfolgender Prozesse hinaus. Zwei statistische Prozesse, nämlich Ankunftsprozess (Einlagerungen) und Bedienprozess (beginnt mit Auslagerungen) müssen durch einen geeignet großen Warteraum enkoppelt werden. Dieser nimmt Forderungen (Lagereinheiten) auf, wenn eine Bedienung nicht sofort erfolgen kann. Immer dann, wenn zufallsbehaftete Vorgänge mit sinnvoll hoher Auslastung der Bedienstation² auftreten, ist das der Regelfall. Diese Entkopplung ist die zentrale *Lageraufgabe*. Die Punkte A1, B1, C1, D1, C2 und C3 der oben aufgelisteten Lageraufgaben fallen in diese Kategorie.

²In einem Handelslager ist die Nachfrage nach Produkten der Bedienprozess. Selbstverständlich wird man hier einen angepassten Ankunftsprozess (Bestellungen) und eine Auslastung von 100% anstreben. Andernfalls entstünden entgangene Umsätze.

In Produktionslagern gilt es, durch permanente Verfügbarkeit von Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen sowie durch sofortige Aufnahme von Produkten und Reststoffen Produktionsausfälle zu vermeiden.

Betriebswirtschaftliche Sicht Die betriebswirtschaftliche Sicht lässt sich von der bedien-theoretischen Sicht nicht trennen. Betriebswirtschaftliche Prozesse sind die Ursache dafür, dass Ankunfts- und Bedienprozess höchst unterschiedlich geartet und zufallsbehaftet sind. Nennungen, die betriebswirtschaftlichen Hintergrund haben, sind A8, C4–C7 und D3.

Prozess-Sicht Manche Prozesse erfordern die Bereitstellung bestimmter Umgebungsbedingungen über längere Zeiträume. Dies kann in Lagern i.S.d. technischen Einrichtung erfolgen. Beispiele für prozessbedingte Lager sind Käsereifelager, Holzlager, Abklingbecken oder Tresore (A2, A5, D2, D4). Diese Aufgaben sind keine Lageraufgaben an sich. Lediglich die überaus großen Prozesszeiten und die daraus resultierenden technischen Einrichtungen führen zur Titulierung als „Lager“ und nicht als „Verarbeitungsmaschine“. Kann die Prozesszeit sehr variabel sein, ist eine klare Aufgabentrennung nicht mehr möglich.

Materialflusstechnische Sicht Materialflusstechnische Lageraufgaben, wie z. B. Verteilen, Zusammenführen oder Sortieren, sind keine Lageraufgaben im eigentlichen Sinne. Die technische Gestaltung und Ausstattung der Lager bringt jedoch notwendigerweise mit sich, dass diese für die Ausführung materialflusstechnischer Operationen gut geeignet sind (A3, A4, A6, A7, B2–B5, C8).

Darüber hinaus kann man bei Lagervorgängen noch zwischen Puffern, Lagern und Speichern differenzieren [Gud05, S. 356]. Die Grenzen zwischen diesen Kategorien sind fließend und beruhen hauptsächlich auf dem unterschiedlichen zeitlichen Horizont der Lagerung (kurzfristig, mittelfristig und langfristig).

In realen Wirtschaftsprozessen befindet sich der überwiegende Teil der Güter im Zustand der Lagerung. In Handelsunternehmen ist die Lagerung in zeitlicher Hinsicht vorherrschend. Handelsunternehmen ohne Lagerung unter eigener Hoheit wären eher als Makler anzusehen. Auch in Produktionsunternehmen macht Warten und damit Lagern den überwiegenden Teil der Prozesszeit aus. Laut der VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik sind 75% der Durchlaufzeiten Wartezeiten. Mit anderen Worten ausgedrückt heißt dies, dass sich 75% aller Bestände im Zustand der Lagerung befinden.

Angesichts dieser Bedeutung der Lagerhaltung wird die Notwendigkeit effizienter Lagerung eindrucksvoll deutlich. Dabei bieten die unterschiedlichen Bauformen von Lagern je nach Situation höchst unterschiedliche Voraussetzungen. Kostengünstige Schaffung und Betrieb umfangreichen Warteraumes ist die Triebkraft für die Schaffung zentraler, teils hochautomatisierter Lager. Solche Lager – nun i. S. v. Lagern als technischer Einrichtung – ersetzen dabei als gemeinsamer Warteraum den Warteraum vor vielen Einzeloperationen bzw. Bedienstationen, soweit die Rahmenbedingen es zulassen. Lager erlauben auf diese Weise eine Verringerung der Gesamtlager- und damit der Prozesskosten. In Prozessketten wird so ein Teil der Warteschlangen trotz Transportaufwand in Lagerbauformen mit niedrigeren Kosten verlagert. Die Einrichtung und Nutzung von Lagern als technische Einrichtung kann deshalb auch als Outsourcing von Warteräumen begriffen werden.

1.3. Begriffe und Sprachregelungen

Für das Verständnis der folgenden Ausführungen ist die Klärung einiger grundlegender Begriffe notwendig. Manche dieser Bezeichnungen sind in durchaus unterschiedlicher Bedeutung im Sprachgebrauch.

Sortiment Das Sortiment ist ein Begriff aus der Warenwirtschaft und bezeichnet die Menge aller von einem Unternehmen angebotenen Produkte. Das Sortiment weist eine Breite und eine Tiefe auf. Dabei steigt mit der Sortimentstiefe die Anzahl von Varianten der Produkte mit gleichem Zweck. Mit größerer Sortimentsbreite wächst die Anzahl der grundsätzlich verschiedenen Produkte.

Aus Sicht der folgenden Untersuchungen sind die logistisch zu unterscheidenden Produkte relevant. Mit Sortiment sind deshalb auch Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe sowie Zwischenprodukte und Abfälle gemeint. Dabei wird das Sortiment jeweils auf diejenigen Produkte eingegrenzt, welche tatsächlich im betrachteten Lager gelagert werden. Sortimentstiefe und -breite werden nicht beschrieben und die Betrachtung wird auf die Anzahl der lagerverwaltungsmäßig zu unterscheidenden Produkte vereinfacht.

Artikel Die oben genannten Produkte werden im folgenden Artikel genannt. In der Lagerverwaltung sind sie anhand einer eindeutigen Kennung oder ID identifizierbar. Auch die als Sorten bezeichneten Varianten eines Produktes, z.B. unterschiedliche Farben, sind aus lagerlogistischer Sicht unterschiedliche Artikel. Aus wenigen produzierten Produkten kann so eine Vielzahl von lagerlogistischen Artikeln entstehen und umgekehrt. Werden beispielsweise 2 produzierte Joghurtsorten auch in Sortierung in den Handel gebracht, sind 3 Artikel im Lager zu verwalten (2x rein, 1x mix). Andererseits kann ein komplettes Tafelservice durchaus nur einen Artikel darstellen, wenn dieses nur als Set zu lagern ist. Ein Artikel ist im Folgenden eine abstrakte logische Einheit, die sich direkt aus dem Zwang zur logistischen Differenzierung ableitet.

Artikeleinheit Eine Artikeleinheit (AE) ist ein Stück (Produktions-, Handels- oder Verkaufseinheit) eines Artikels.

Lagereinheit Eine Lagereinheit (LE) ist die in den Lagerprozessen zu behandelnde Einheit. Lagereinheiten enthalten i. d. R. mehrere Artikeleinheiten. Die Betrachtung von Lagereinheiten impliziert die Betrachtung von Stückgütern. Lagerformen wie Silos oder Bunker werden nicht untersucht.

Lagerort Ein Lagerort ist eine geometrisch bestimmte Position im Lager, welche eine einzelne Lagereinheit aufnehmen kann. Die Begriffe Lagerplatz, Lagerfach, Lagerpunkt und Stellplatz werden synonym zu Lagerort verwendet.

Aus Sicht des Transports im Lager ist ein Lagerpunkt eine Position, auf welche das (unstetige) Fördermittel (z. B. das Regalbediengerät) positioniert werden muss, um den Lagerplatz zu bedienen. Dabei ist an einem Lagerpunkt praktisch oft mehr als ein Lagerplatz zu erreichen. Da für die folgenden Untersuchungen aber die Fahrzeit zu jedem einzelnen Lagerort von Belang ist, verfälscht die Gleichsetzung die Ergebnisse nicht.

Ob jeweils ein, zwei oder mehr Lagerorte mit identischer Fahrzeit in die Berechnung einfließen, ist für die Berechnungsergebnisse nicht relevant.

Um die Darstellung zu vereinfachen, lässt sich bei gassengebundenen Lagern mit beiderseitigen Regalen regelmäßig der Faktor 2 herauskürzen.

In den durchgeführten Simulationsuntersuchungen wurde jeweils das Sortiment so gewählt, dass im Mittel ausreichend Lagerkapazität vorhanden ist. Doppelttiefe Lagerung findet nicht statt.

Lagerkapazität Die Lagerkapazität N ist die Anzahl der Lagereinheiten, welche maximal von einem Lager aufgenommen werden kann. Gleichzeitig ist das die Anzahl der im Lager verfügbaren Lagerorte.

Lagerleistung Die Lagerleistung γ wird in Abschnitt 4.1 auf Seite 29 in den Gleichungen (4.1) bis (4.3) definiert.

Los Ein Los ist eine Gütermenge mit gleichen Merkmalsausprägungen, welche entweder in einem zusammenhängenden Produktionsprozess hergestellt, mit der selben Bestellung beschafft oder für den selben Transport zusammengefasst wurden. In dieser Arbeit enthält ein Los ausschließlich Einheiten des selben Artikels.

Lorenzkurve Die Lorenzkurve (nach [Lor05]) dient zur grafischen Veranschaulichung einer statistischen Verteilung und dabei insbesondere ihrer Konzentration oder Ungleichverteilung. Definitions- und Wertebereich der Kurve liegen im Intervall $[0\%, 100\%]$. Die Lorenzkurve einer Verteilung ohne Konzentration, d. h. einer Gleichverteilung entspricht der 45°-Line zwischen $(0\%, 0\%)$ und $(100\%, 100\%)$. Eine Lorenzkurve ist immer konvex und stetig.

Gini-Koeffizient Der Gini-Koeffizient (nach [Gin55]) ist eine statistische Maßzahl für die relative Konzentration einer Verteilung. Er berechnet sich als Quotient der Fläche zwischen den Lorenzkurven der beobachteten Verteilung und der Gleichverteilung dividiert durch die Fläche unterhalb der Lorenzkurve der Gleichverteilung. Die Gleichverteilung hat den Gini-Koeffizienten 0, die maximale Konzentration den Gini-Koeffizienten 1.

2. Sortimente, Disposition und Bestände

2.1. Sortimente

Lager müssen die wesentlichen Mengen der in einem Unternehmen vorzufindenden materiellen Güter aufnehmen. Selbst in Unternehmen, die nur wenige Produkte herstellen, muss aus logistischer Sicht mit umfangreichen Sortimenten umgegangen werden. Einzelne Produkte können durch unterschiedliche Optionen und Varianten sowie Anpassungen an den jeweiligen Zielmarkt eine Vielzahl von Artikeln hervorbringen. Beispiele wären Unterscheidungen nach Mindesthaltbarkeitsdatum oder Charge, verschiedensprachlichen Kennzeichnungen oder der Anpassung an landestypische Gegebenheiten wie gesetzliche Vorschriften oder technische Rahmenbedingungen. Um diesen Effekt zu begrenzen, werden verstärkt Produkte entwickelt, die ohne Modifikationen möglichst viele Bereiche abdecken. Folgen dieser Vorgehensweise sind u. a. die umfangreichen Bedienungsanleitungen, in denen die Anzahl der Sprachen die Anzahl der Seiten in einer Sprache übertrifft oder auch die mit babylonischem Kleingedruckten übersäten Produktverpackungen. In einzelnen Unternehmen praktisch auftretende Sortimente umfassen bis zu 350 000 Artikel, welche in Lagern verschiedener Bauformen gelagert werden. Die Kapazität einzelner Lager kann 100 000 Lagereinheiten auch bei Palettenlagern überschreiten.

2.2. Dispositionsverfahren

Materialwirtschaft und damit Lagerhaltung haben ganz im Sinne der „bedientheoretischen Sicht“ (s. S. 11) die Aufgabe, eine hohe Auslastung der Ressourcen zu sichern. Dies erfordert permanente Verfügbarkeit von Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen bzw. von Waren sowie die zuverlässige Aufnahme bzw. Abgabe der Fertigprodukte. Die dafür angemessenen, wirtschaftlich optimalen Mengen müssen disponiert werden.

2.2.1. Einfache Nachschubstrategien

Einfache Verfahren, welche diese permanente Verfügbarkeit sicherstellen sollen, sind

- Meldebestandsverfahren und
- Zykluszeitverfahren

zur Bestimmung des Zeitpunktes der Nachschubauslösung sowie

2. Sortimente, Disposition und Bestände

- optimale Nachschubmenge und
- Auffüllmenge auf einen Sollbestand

zur Bestimmung der jeweiligen Nachschubmengen [Gud05, S. 403][Nah97, S. 289ff.][SPP98, S. 318ff.]. Die Bestimmung von Melde- oder Sollbeständen stützt sich dabei auf Verbrauchsraten, Wiederbeschaffungszeiten und Sicherheitsbestände. Lässt man Trends, Anpassungen daran und stochastische Einflüsse außer Acht, pendelt der Bestand jedes einzelnen Artikels ungefähr zwischen Maximal- und Minimalbestand. In der praktischen Anwendung werden teils Bestellungen für einzelne Lieferanten gezielt gebündelt oder an die Transportmittelkapazität angepasst oder zur Erzielung von Mengeneffekten (Rabatten) erhöht, was die (kumulierten) Bestandsschwankungen vergrößert.

Bestände oder Artikel, welche solchen Erwägungen unterliegen, werden dispositiv genannt. Auf andere Arten von Artikeln und Beständen wird in Abschnitt 6.1 auf Seite 95 eingegangen. Die Bestimmung optimaler Nachschubmengen wird im Folgenden konkretisiert.

2.2.2. Grundmodell der optimalen Bestellmenge

In der Serien- und Sortenfertigung werden verwandte Produkte mit den gleichen Produktionseinrichtungen gefertigt. Dabei sind zwischen verschiedenen Sorten Kosten verursachende Umrüstvorgänge erforderlich. Um diese Kosten zu verringern, werden Lose gebildet und nur nach Fertigstellung eines kompletten Loses die Sorte gewechselt. In Handelsunternehmen werden durch Losbildung Bestellkosten vermieden oder Rabatte erschlossen. Die Kosten sinken mit steigender Losgröße. Dem gegenüber steigen mit größeren Losen die Lagerhaltungskosten.

Das einfachste und verbreitetste Modell zur Bestimmung der betriebswirtschaftlich optimalen Größe von Losen und damit der Artikelbestände ist das „Grundmodell der optimalen Bestellmenge“ (engl. Economic Order Quantities, kurz EOQ). Dieses Modell wurde bereits 1913 von HARRIS [Har13] vorgestellt. ANDLER [And29] führte in Deutschland eine verfeinerte Form ein (vgl. [Kri05]). Das Modell beruht auf der Minimierung der Gesamtkosten K_G , welche sich als Summe von Lagerhaltungskosten K_L und Bestellkosten K_B ergeben. Dabei gilt

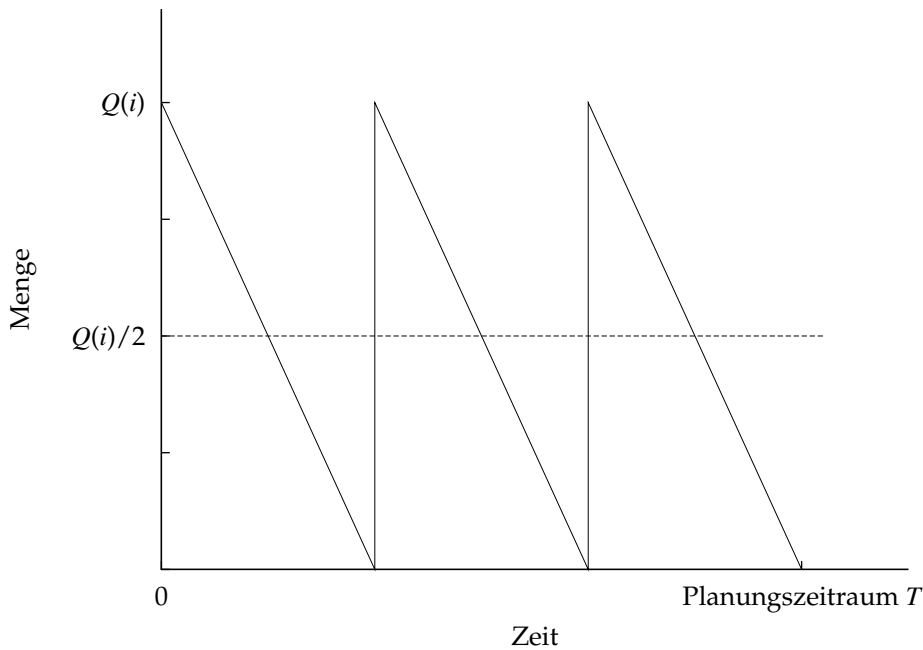
$$K_B = k_b \cdot \frac{M(i)}{Q(i)}, \quad (2.1)$$

wobei k_b fixe Kosten pro Bestellvorgang sind und $M(i)$ der Gesamtbestellmenge im Planungszeitraum entspricht. Die Lagerhaltungskosten sind *de facto* Bestandskosten in der Höhe von

$$K_L = k_l \cdot \frac{Q(i)}{2}. \quad (2.2)$$

Die Lagerkosten k_l einer einzelnen Einheit im Planungszeitraum T ergeben sich aus den Kapitalbindungskosten und den Lagerbetriebskosten. Die Verbrauchsrate $D(i)$ hängt mit $M(i)$ und T nach

$$D(i) = \frac{M(i)}{T} \quad (2.3)$$

Abbildung 2.1.: Bestandsverlauf des Artikels i bei 3 Bestellungen im Planungszeitraum

zusammen. Minimierung von K_G ergibt die „klassische Losgrößenformel“ mit $Q(i)$ als optimaler Losgröße:

$$Q(i) = \sqrt{\frac{2k_b D(i)}{k_l}} \quad (2.4)$$

Dieses Grundmodell geht von einer stark vereinfachten Planungssituation aus, in der gilt [BBGR92, S. 186 und S. 249]:

1. Der Bedarf $D(i)$ im Planungszeitraum ist bekannt.
2. Der Verbrauch erfolgt kontinuierlich mit konstanter Rate.
3. Die Bestände zu Beginn und Ende des Planungszeitraumes sind Null.
4. Über- und Unterdeckungen sowie Sicherheitsbestände treten nicht auf.
5. Die Bestellmenge ist von Bestellung zu Bestellung konstant.
6. Es existieren keine äußeren Restriktionen (Finanzierung, Lagerkapazität).
7. Es treten keine Mengenabweichungen auf (Bestellmenge gleich Liefermenge).
8. Die Bestandsauffüllung erfolgt unverzüglich und vollständig zum Bestellzeitpunkt (Beschaffungsrate ∞).

2. Sortimente, Disposition und Bestände

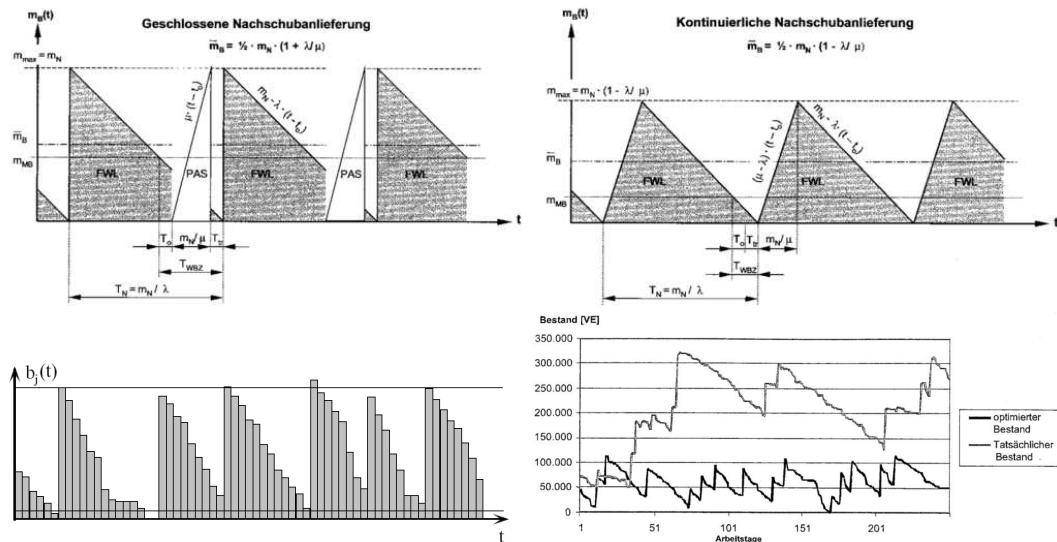


Abbildung 2.2.: Beispiele für Bestandsverläufe (Quellen: oben [Gud04a], unten links [AF04], unten rechts [Gud04b])

Bei endlicher Zugangsrate ist das Modell direkt auf die Produktionslosgrößenplanung übertragbar. Dabei entspricht dann $M(i)$ der Produktionsmenge, und k_b ist als Rüstkostensatz pro aufgelegtem Los aufzufassen.

Da dieses Modell eingängig, sehr gut erweiterbar und in breiter Anwendung ist, hat das Modell fundamentale Bedeutung in der Bestellmengen-, Produktions- und Lagerplanung. Es wird in vielen Veröffentlichungen zum Thema Bestellmengen-, Produktions- und Lagerplanung als Grundmodell verwendet.

Erweitert man dieses Modell durch detailliertere Ansätze für die mittlere gelagerte Menge als $\frac{Q(i)}{2}$ in Gleichung (2.2), können je nach Ansatz die Bedingungen 2, 3, 4, 7 bzw. 8 fallen gelassen werden. Zusätzlich sind in diesem Zusammenhang noch stochastische Einflüsse und Sicherheitsbestände relevant.

2.3. Bestandsverläufe

Alle dispositiven Artikelbestände, also insbesondere auch jene, bei denen wirtschaftliche Losgrößen bestimmt werden, weisen einen sägezahnartigen Verlauf auf. Mehr noch begründet vor allem dieser typische Bestandsverlauf die Notwendigkeit der Lagerung des Artikels an sich, sieht man von Nebenaufgaben der Lagerung ab. Dabei ist es unerheblich, ob es sich um Handelsartikel, produzierte Zwischen- oder Endprodukte oder zwecks Transport zusammengestellte Lose handelt. Diesen Umstand bestätigen zahlreiche, auch jüngste Veröffentlichungen. In Abbildung 2.2 sind einige Beispiele dargestellt. Auch in englischsprachiger Literatur zum Bestandsmanagement wird regelmäßig auf die Sägezahnform verwiesen („saw-tooth“ shaped) [Nah97, SPP98, SK08].

Dass diese Bestandsverläufe auch praktisch auftreten, zeigt Abbildung 2.3.

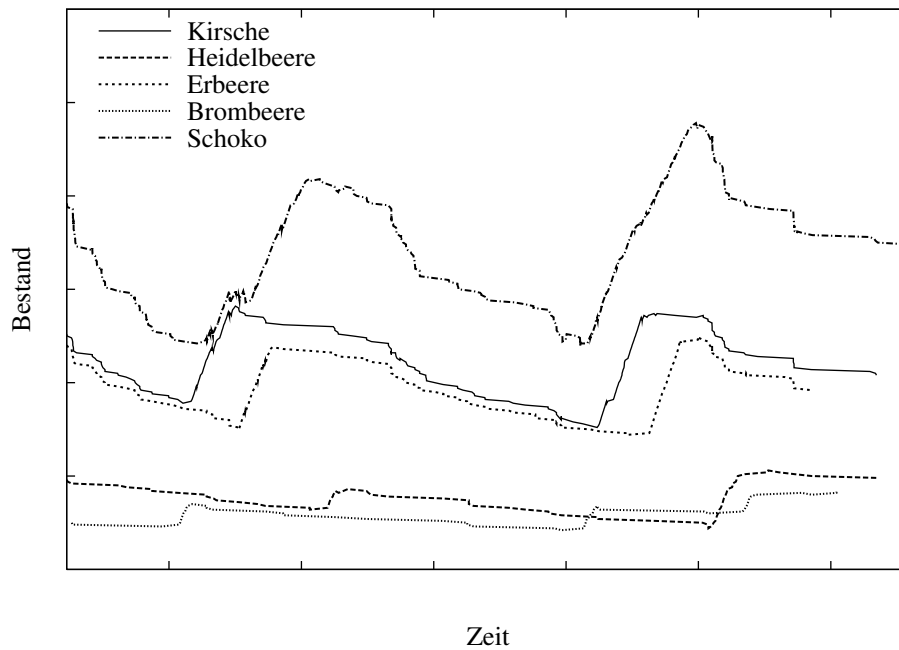


Abbildung 2.3.: Bestandsverlauf verschiedener Joghurtmarken in einer Molkerei (Quelle: eigene Erhebung)

Sind die Zeitpunkte von Ein- und Auslagerungen einzelner Lagereinheiten über Regeln wie First-In-First-Out (FIFO) zuordenbar, erwächst aus diesen typischen Bestandsverläufen zusätzliches, bisher weitgehend ungenutztes Potential für Schnellläuferstrategien. Das Kapitel 5 beschreibt dieses Optimierungspotential und zeigt einen Weg auf, dieses Potential zu erschließen.

3. Lagerstrategien und Lagerdimensionierung

3.1. Lagerdimensionierung

Wie bereits ausgeführt betrachten Logistikunternehmen ihre Lager als wichtigste Sachanlagen [BT02]. Angesichts der beachtlichen Investitions- und Betriebskosten hat die effiziente Gestaltung der Lager und Lagerprozesse hohe Priorität.

ARNOLD nennt als generelle Aufgabe der Lagerplanung: „[...] ein Lager so auszulegen, dass es bei kleinstmöglicher Kapazität ausreichend nutzbar ist.“ [Arn97, S. 142]. Der Kapazitätsbegriff bezieht sich dabei einerseits auf die Bereitstellung der notwendigen Lagerplatzkapazität und andererseits auf die Bereitstellung der notwendigen Kapazität für den Umschlag und den Transport der Lagereinheiten (s. auch [AK85, S. 272]). Diese zentralen Dimensionierungsgrößen eines Lagers werden im Folgenden Lagerkapazität und Lagerleistung genannt. Die Lagerleistung sollte besser als Lagergrenzleistung bezeichnet werden (s. Abschnitt 3.2 auf Seite 26), worauf aber aus Vereinfachungsgründen verzichtet wird.

Bei der Lagerdimensionierung sind somit zwei zentrale Fragen zu beantworten:

1. Welche Lagerplatzkapazität muss bereitgestellt werden?
2. Welche Anordnung und technische Ausstattung der Lagerplätze und des Lagers muss gewählt werden, um diese Lagerkapazität nutzbar zu machen?

Wie diese Fragen beantwortet werden, ist von besonderer Tragweite für den zukünftigen Geschäftsbetrieb. Die Entscheidungen führen zu harten Restriktionen, welche nur mit hohem Investitionsaufwand revidiert werden können.

Die konkrete Entscheidungsfindung hängt von zahlreichen Faktoren ab. Den größten Einfluss hat dabei das zu lagernde Sortiment mit seinem Umfang, seiner Struktur und seiner Dynamik. Es bestimmt maßgeblich den erforderlichen Lagerdurchsatz und in Verbindung mit den Dispositionsstrategien über die Bestandsverläufe (s. Abschnitt 2.3) auch die notwendige Kapazität. Bei der Lagerplanung hängt von der konkreten Situation ab, ob das Sortiment als externer Faktor zu betrachten und als gegeben hinzunehmen ist, oder ob es in Hinblick auf die Lagergestaltung angepasst werden kann.

Weitere Einflussfaktoren ergeben sich aus dem betrieblichen Umfeld. Dieses bestimmt Kostenfaktoren für die Dispositionsstrategien, Prozessrestriktionen, Sicherheitszuschläge *etc.* Auch die baulichen Möglichkeiten wirken auf die Entscheidungen ein.

3.1.1. Bestimmung der Lagerkapazität

Der Bestimmung der notwendigen Lagerkapazität geht eine Bestandsanalyse voraus. Jeder einzelne Artikel weist teils mehr oder weniger stochastische Bestandsschwankungen auf. Bei der Lagerung mehrerer Artikel in einem Lager können sich diese Schwankungen teilweise ausgleichen. Dieser Ausgleich kann durch verschiedene Nachschubstrategien (s. Abschnitt 2.2.1 auf Seite 15) oder eine exklusive Zonenzuordnung (s. Abschnitt 4.5.3 auf Seite 47) beeinträchtigt sein. Die benötigte Lagerkapazität ist deshalb vom Sortiment und den Dispositions- und Lagerstrategien abhängig.

In [AF04, S. 186 ff.] wird ein präzises und gleichzeitig allgemeingültiges Verfahren vorgestellt, welches über die Faltung der Bestandshäufigkeiten der Einzelartikel auf die Verteilung der Bestandshäufigkeiten insgesamt schließt. Auf diese Weise lässt sich die Überschreitungswahrscheinlichkeit einer gegebenen Lagerkapazität bestimmen.

Dennoch werden für die Bestimmung der Lagerkapazität in der Praxis oft vereinfachte Verfahren eingesetzt. Das bekannteste davon ist die Anwendung des Grenzwertsatzes der Statistik. Das Verfahren ist ebenfalls in [AF04, S. 183 ff.] erläutert.

Im Folgenden werden kurz die Ausgleichseffekte illustriert, welche sich durch die gemeinsame Lagerung von Artikeln ergeben. Die Verteilungsdichte eines Lagerbestandes zweier identischer nach dem klassischen Losgrößenmodell mit Sicherheitsbestand a wiederbeschaffter Artikel mit Wiederbeschaffungsmenge $b - a$ lautet:

$$f(x) \cdot (b - a) = \begin{cases} 0 & \text{bei } 0 \leq x < 2a \\ x - 2a & \text{bei } 2a \leq x < a + b \\ 2b - x & \text{bei } a + b \leq x < 2b \\ 0 & \text{bei } 2b \leq x. \end{cases} \quad (3.1)$$

Im einfachsten Fall ist der Sicherheitsbestand $a = 0$. Damit reduziert sich 3.1 zu

$$f(x) \cdot b = \begin{cases} x & \text{bei } 0 < x < b \\ 2b - x & \text{bei } b < x < 2b \\ 0 & \text{bei } 2b < x. \end{cases} \quad (3.2)$$

Die Verteilungsfunktion lautet dann

$$F(x) = \begin{cases} \frac{x^2}{2b^2} & \text{bei } 0 < x < b \\ -\frac{x^2}{2b^2} + \frac{2x}{b} - 1 & \text{bei } b < x < 2b \\ 1 & \text{bei } 2b < x \end{cases} \quad (3.3)$$

und ist eine symmetrische Dreiecksverteilung.

Soll das Lager im 2-Artikel-Fall mit einer Sicherheit $(1 - \alpha)$ ausreichend sein, ergibt sich eine notwendige Lagerkapazität von

$$C(b, \alpha) = b \left(2 - \sqrt{2\alpha} \right). \quad (3.4)$$

Muss das Lager mit 90%iger Sicherheit ausreichen ($\alpha = 0.1$), sollte die Lagerkapazität $1.55b$

betragen. Im Vergleich zu fester Lagerplatzzuordnung, welche für diese Sicherheit $1.8b$ benötigt ist das bereits eine Einsparung von 14% der Kapazität.

Bei steigender Artikelanzahl n nähert sich die Verteilung immer mehr einer Normalverteilung der Form $N\left(\frac{b}{2}n, \sqrt{\frac{b^2}{12}n}\right)$ an. Im Grenzfall beträgt die benötigte Lagerkapazität $\frac{b}{2}n$. Der Ausgleich der Bestandsschwankungen kann die notwendige Lagerkapazität so um bis zu 50% verringern. Praktisch ist diese Einsparung nicht zu erzielen, da die endliche Artikelanzahl, die Ungleichverteilung im Sortiment und verschiedene im Praxiseinsatz befindliche Verfahren, wie die Bündelung von Bestellungen, dies verhindern.

3.1.2. Bestimmung der notwendigen Lagerleistung

Die Bestimmung der notwendigen Lagerleistung erfolgt meist durch Rückgriff auf die einschlägigen Berechnungsvorschriften, wie die FEM Regel 9.851 oder die VDI-Richtlinie 4480 [FEM03, Log98]. Diese Regeln konzentrieren sich auf die Berechnung der Erwartungswerte von Spielzeiten. Die *Spielzeit* ist die Summe aller während eines Bearbeitungszyklus anfallenden Zeiten (s. auch Abschnitt 4.1 auf Seite 29). Für die Spielzeitberechnung kann auf umfangreiche Literatur zurückgegriffen werden. LIPPOLD bietet eine sehr gute Zusammenfassung und Bewertung dieser Verfahren [Lip03, S. 77 ff.].

3.2. Belegungsstrategien

Um auf Lagerkapazität und Lagerleistung Einfluss zu nehmen, können zahlreiche Strategien zur Anwendung kommen. GUDEHUS unterteilt dabei grundsätzlich in Belegungsstrategien und in Bewegungsstrategien [Gud05, S. 616]. Die *Bewegungsstrategien* zielen auf die Optimierung der Abfolge der Bewegungen der Transportmittel im Lager ab. Doppelspiel- und Ruhepunktstrategien fallen in diese Kategorie. Die *Belegungsstrategien* versuchen die Zuordnung von Lagereinheiten oder Artikeln zu Lagerorten zu optimieren. Die Schnellläuferstrategien, welche Gegenstand dieser Arbeit sind, bilden den wesentlichen Teil der Belegungsstrategien. Weitere Belegungsstrategien sind die auf Lagergassen bezogene Gleichverteilungsstrategie, artikelreine oder -gemischte Platzbelegungen sowie das Minimieren von Anbruchlagerplätzen.

Die Zuordnung einer Lagereinheit zu einem Lagerplatz ist zwangsläufig bei jeder Einlagerung auszuführen. Aber auch dann, wenn bei einer Anforderung eines bestimmten Artikels zwischen mehreren Lagereinheiten mit diesem Artikel ausgewählt werden kann, muss eine bestimmte Lagereinheit und damit der zugeordnete Lagerplatz ausgewählt werden. Reicht die gelagerte Menge des Artikels auf dieser Lagereinheit nicht mehr aus, wird das Kalkül auf weitere Lagereinheiten analog angewandt.

Die Stellplatzzuordnung erfolgt dabei anhand bestimmter Attribute der Lagereinheiten. In der Literatur werden als Kriterien für die Zuordnung

- die Artikelnummer des Artikels der Lagereinheit,
- physische Eigenschaften der Lagereinheit (Abmessungen, Masse),

3. Lagerstrategien und Lagerdimensionierung

- Anforderungen durch das Lagergut (klimatische Bedingungen, Gefährdungspotential),
- das Produktionsdatum der Ware,
- das Zugangsdatum der Ware,
- das Länderkennzeichen und
- die voraussichtliche Verweildauer

genannt [Bra97]. Weiterhin sind Eigenschaften des gelagerten Artikels, wie z. B. Qualitätsstufe, Charge usw. als Kriterium denkbar. Auf operativer Ebene wird in diesen Fällen nicht mehr von einem sondern von mehreren Artikeln ausgegangen.

Auslagerungsanforderungen beziehen sich i. d. R. auf eine Kombination der genannten Attribute.

Die Attribute der Lagereinheiten müssen bei Ein-, Aus- und Umlagerungen auf entsprechende Attribute der Lagerplätze abgebildet werden. Attribute von Lagerplätzen i. d. S. sind:

- die Verfügbarkeit – Der Platz ist nicht gesperrt. Er ist nicht belegt bzw. enthält Artikel mit den geforderten Attributen.
- die Fahrzeit zu diesem Lagerplatz von der Ein- und Auslagerpositionen
- technische Spezifikationen des Lagerplatzes (Abmessungen, Gewichtsbeschränkung)
- Spezifikationen der Lagerplatzumgebung (klimatische Verhältnisse, Schutzeinrichtungen)

Einige wenige Belegungsstrategien greifen ausschließlich auf Attribute der Stellplätze zurück, wie z. B. die Kürzeste-Fahrzeit-Strategie oder die Gleichverteilungsstrategie.

Auf welche Art und Weise die Zuordnung letztendlich erfolgt, leitet sich aus der logistischen Aufgabe und den technischen Restriktionen ab. Z. B. muss die Lagerung von Kühlware in entsprechend klimatisierten Lagerbereichen erfolgen. Die Verbindlichkeit geometrischer Grenzen ist offensichtlich. Die Einhaltung dieser restriktiven Kriterien ist in jedem Falle erforderlich. Dabei kann noch nicht von der Anwendung von Strategien gesprochen werden.

Sind die Restriktionen erfüllt, können verschiedene Zuordnungsstrategien zum Einsatz kommen. Diese Strategien verfolgen unterschiedliche Ziele:

Verringerung des Zuordnungsaufwands Da eine Zuordnung von Lagereinheiten zu Stellplätzen unabdingbar ist, wird bei Nichtberücksichtigung sonstiger Ziele versucht, den Aufwand für diese Zuordnung zu minimieren.

Diese Minimierung bezieht sich sowohl auf die Planung und Implementierung des Zuordnungsverfahrens als auch auf dessen Ausführung. Bei den auf relationalen Datenbanken aufbauenden Lagerverwaltungssystemen wird eine Abfrage der Form „SELECT Lagerplatz WHERE (Restriktionen erfüllt) LIMIT 1“ gestellt. Praktisch führt das serverintern zu einer Folge von Vergleichen der Lagerplatzattribute mit den geforderten Kriterien, insbesondere der Lagerplatzverfügbarkeit. Bei sinnvoller interner Organisation der

Tabelle der Lagerplätze entspricht diese Verfahrensweise einer Gleichverteilungs- oder Kürzeste-Fahrzeit-Strategie. Um die Anzahl der notwendigen Vergleiche zu verringern, insbesondere falls keine sonstigen Restriktionen erfüllt werden müssen, wird oft auch eine Anzahl zuletzt freigewordener Lagerplätze im Materialflussrechner gepuffert und bevorzugt vergeben. Zur Verringerung des Zuordnungsaufwandes geeignete Strategien sind:

Gleichverteilungsstrategie Das Ziel der Gleichverteilung ist hier nicht, eine Gleichverteilung der Lagereinheiten über die Lagerplätze gleich zu erreichen. Stattdessen kann sie Folge der Auswahl irgendeines geeigneten Lagerortes sein.¹

Kürzeste-Fahrzeit-Strategie Bei freier Lagerplatzvergabe, balancierten Ein- und Auslagerungen und minimierter Lagerkapazität kann diese Strategie identisch mit der Gleichverteilungsstrategie sein (s. auch in Abschnitt 5.5.3.1 auf Seite 85 und [HSG76, S. 631]). Dagegen sprechen die in Abschnitt 5.5.3.4 auf Seite 88 geschilderten Effekte.

Round-Robin-Zuweisung Die Lagerplätze werden umlaufend auf Eignung untersucht. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit maximiert, dass der untersuchte Platz bereits wieder verfügbar ist. Das minimiert die Anzahl der notwendigen Vergleiche und ist darüber hinaus äußerst einfach zu implementieren.

Verringerung der notwendigen Lagerkapazität Die Verringerung der notwendigen Lagerkapazität ist aus zwei Gründen wünschenswert. Erstens verringern sich dadurch die Kosten für Errichtung und Betrieb des Lagers. Zweitens ist durch die resultierenden kürzeren Wege höherer Durchsatz möglich. Alternativ können die Anforderungen an die Transportmittel im Lager gesenkt werden.

Die notwendige Lagerkapazität muss nur dann der Summe (C_{max}) der Maximalbestände von Lagereinheiten aller Artikel entsprechen, wenn diese gleichzeitig auftreten oder jedem Artikel ein fester Lagerbereich zugeordnet ist.

In dem Maße, in dem diese beiden Aspekte nicht auftreten, wird eine geringere Lagerkapazität ermöglicht. Höchstbestände einiger Artikel werden durch Niedrigstbestände anderer Artikel ausgeglichen, falls die Bestandshöhe verschiedener Artikel nicht positiv korreliert². Weiterhin müssen Lagereinheiten mit verschiedenen Artikeln auf dem gleichen Platz gelagert werden dürfen. In diesem Fall spricht man von freier (variabler, chaotischer) Lagerplatzvergabe im Gegensatz zu fester Lagerplatzvergabe. Zwischen fester und freier Lagerplatzvergabe gibt es zonenbasierte Zwischenformen. Dabei werden Klassen von Lagerplätzen gebildet, denen nur Lagereinheiten zugeordnet werden, deren Attributausprägungen in bestimmte Wertebereiche fallen. Mit steigender Zonenanzahl geht man dabei von freier auf feste Lagerplatzvergabe über, wobei die benötigte Lagerkapazität auf C_{max} steigt. Dieser kapazitätsbedarfserhöhende Effekt von Zonen

¹Davon abzugrenzen ist die Gleichverteilungsstrategie bezogen auf Lagergassen. Diese Strategie versucht Lagereinheiten eines Artikels möglichst gleichmäßig auf alle vorhandenen Gassen zu verteilen, um die Wahrscheinlichkeit der Verfügbarkeit eines Artikels bei Ausfällen von Gassen zu erhöhen.

²Das ist bei allen Saisongeschäften, z. B. im Spielzeughandel, der Fall. Der Spielzeuggroßhandel baut ab Mitte des Jahres Bestände für das Weihnachtsgeschäft auf.

3. Lagerstrategien und Lagerdimensionierung

tritt nur dann auf, wenn die Lagerung in „falschen“ Zonen ausgeschlossen wird. Zonen, in denen keine Lagereinheiten gelagert werden dürfen, deren Attributausprägungen nicht den Vorgaben entsprechen, werden im Folgenden *exklusive Zonen* genannt werden.

Im besten Fall entspricht die notwendige Lagerkapazität der Summe aller durchschnittlich gelagerten Lagereinheiten der Artikel. Ohne Sicherheitsbestände entspricht dies $\frac{C_{max}}{2}$. Der Verringerung des Lagerplatzbedarfes dient deshalb die Strategie der *freien Lagerplatzvergabe* bzw. *nicht-exklusiver Zonen*.

Zur Verringerung der notwendigen Lagerkapazität trägt auch die Strategie bei, *Anbruchlagereinheiten bevorzugt* auszulagern. In der Regel enthält eine Lagereinheit bei sinnvoller Wahl der Ladungsträger $C_{LE} > 1$ Arteikeinheiten. Zwei Ursachen können dazu führen, dass mindestens eine Lagereinheit pro Artikel nicht vollständig belegt ist:

1. Falls die Zugangsmenge eines Artikels nicht ganzzahlig durch die Anzahl Arteikeinheiten pro Lagereinheit C_{LE} teilbar ist, gibt es eine Lagereinheit die im Mittel zu einem Anteil $\frac{C_{LE}-1}{2C_{LE}}$ leer ist. Auch wenn die Zugangsmenge kleiner als die Kapazität einer Lagereinheit ist, wird dennoch eine ganze Lagereinheit benötigt. Dispositionsstrategien versuchen oft, diese Situation durch Anpassung der Bestellmenge zu vermeiden [Gud05, S. 619ff].
2. Werden Lagereinheiten nach Artikelentnahme wieder rückeingelagert, befindet sich pro Artikel im Lager mindestens eine Lagereinheit, welche durchschnittlich nur zu einem Anteil $\frac{C_{LE}+1}{2C_{LE}}$ belegt ist. Diese Lagereinheit ist gleichzeitig die zuletzt eingelagerte und würde bei strikter Einhaltung einer lagerbezogenen FIFO-Regel erst dann wieder ausgelagert, nachdem alle anderen Lagereinheiten mit diesem Artikel bewegt worden sind. Letztendlich würde sich das Lager mit teilbelegten Lagereinheiten „füllen“.

Das effektiv nutzbare Lagervolumen bleibt dadurch geringer als das tatsächliche Lagervolumen. Um diesen Effekt zu begrenzen werden deshalb teilgefüllte Lagereinheiten bevorzugt entnommen und dabei auch die strenge FIFO-Regel durchbrochen. Alternativ wird eine *Ladungsträgerkonsolidierung* durchgeführt. Dabei werden Anbruchmengen von verschiedenen Lagereinheiten in einem separaten Prozess zusammenführt.

Erhöhung der Grenzleistung des Lagers Die Erhöhung der Grenzleistung des Lagers ist die Domäne der *Schnellläuferstrategien* und Hauptgegenstand dieser Arbeit. Die Lagergrenzleistung gibt bezogen auf eine Zeiteinheit an, wie viele Lagereinheiten das Lager maximal durchlaufen können. Sie entspricht der Hälfte der Summe der in einer Zeiteinheit ausführbaren Ein- und Auslagerungsvorgänge. Die Lagergrenzleistung wird meist über die Berechnung mittlerer Spielzeiten im Lager bestimmt (s. Abschnitt 4.1 auf Seite 29).

Durch den Einsatz von Schnellläuferstrategien verringern sich die Anforderungen an die Transportmittel im Lager.

Abstimmung der Lagergrenzleistung auf die Lastsituation Eine weitere Klasse von Belegungsstrategien versucht die Lagergrenzleistung an die Tagesganglinie der Leis-

tungsanforderungen anzupassen. Die Cache-Strategien versuchen die in Spitzenlastzeiten benötigten Lagereinheiten während lastschwacher Zeiten auf besonders zugriffsgünstige Lagerorte zu verbringen. Dies ist nur dann möglich, wenn auszuführende Lageroperationen mit ausreichendem Vorlauf bekannt sind. Ein typischer Fall wäre, wenn der Lagerbetrieb des gesamten Folgetages aus den Umsätzen des Vortages vorausberechnet werden kann und keine transportlogistischen Probleme abgefangen werden müssen. Die Leistungssteigerung in Spitzenlastzeiten wird durch verminderte Leistung während anderer Zeiten und durch zusätzliche Lageroperationen erkauft. Die Strategie ist nur dann sinnvoll, wenn in ausreichendem Umfang Niedriglastzeiten auftreten.

3.3. Probleme der Lagerplanung

Bei der Planung eines optimalen Lagers müssten administrative, dispositive und operative Strategien als Gesamtheit betrachtet und behandelt werden. Das tatsächliche Optimum des Lagerbetriebes zu erreichen, erscheint als praktisch aussichtsloses Unterfangen. Dennoch wird zumindest versucht, sich an das Optimum anzunähern. Die praktischen Probleme bei der Lagerplanung haben eine ganze Reihe von Gründen:

1. Im administrativen Bereich bestehen erhebliche Planungsunsicherheiten. Diese führen dazu, dass die dispositive und die operative Ebene eher auf Flexibilität hinsichtlich der konkreten administrativen Anforderungen als auf optimale Anpassung an die derzeitige (Planungs-)Situation ausgelegt werden müssen.
2. Die Gestaltung jeder dieser Ebenen für sich weist bereits eine beträchtliche Komplexität auf. Der Planungsaufwand für eine integrale Betrachtung aller Aspekte übersteigt meist die vorhandenen Möglichkeiten zeitlich und finanziell, auch ohne dass durch diesen Aufwand alle Unsicherheiten ausgeräumt werden könnten. Zwischen Projektstart und der verbindlichen vertraglichen Festlegung auf eine konkrete Gestaltung vergehen oft nur zwei Wochen [GMB⁺02]. Dabei müssen außerordentlich heterogene Daten zusammengetragen und in Datenbanken konsolidiert werden. Diese Daten stammen aus sehr unterschiedlichen Quellen, wie z. B. Betriebsdaten, Marktforschungen und Spezifikationen von Anlagenanbietern. Die Daten weisen komplexe Korrelationen und zahlreiche Restriktionen auf, deren Erkennung und Berücksichtigung für ein optimales Planungsergebnis notwendig ist [GAB⁺00].
3. Bei der Gestaltung von Lagersystemen werden regelmäßig organisatorische Grenzen innerhalb eines Unternehmens oder auch innerhalb einer Supply Chain überschritten. Dies erschwert die Kommunikation und führt zu teils ungeklärten Verantwortlichkeiten für Datenbereitstellung und Entscheidungsfindung.
4. Einerseits gibt es zahlreiche wissenschaftliche Veröffentlichungen zu sehr spezifischen Verfahren und Lösungen für die Dimensionierung und den Betrieb von Lagern (s. Abschnitt 4.4). Andererseits wird immer wieder von erfolgreichen Gesamtlösungen berichtet, ohne einen Bezug zu den theoretischen Grundlagen und der Ausgangssituation

3. Lagerstrategien und Lagerdimensionierung

herzustellen. Selbst Arbeiten, welche ausdrücklich eine Gesamtsicht verfolgen, beginnen mit umfangreichen Abgrenzungen und Einschränkungen. Exemplarisch seien hier CORMIER und GUNN genannt [CG96]. GOETSCHALCKX *et al.* bringen diesen Umstand in [GMB⁺02, S. 1] auf den Punkt: „But, a comprehensive science-based methodology for the overall design of warehousing systems does not appear to exist.“

5. Die Komplexität der Gestaltung von Lagersystemen nimmt unter dem Einfluss des elektronischen Handels weiter zu [See05, S. 38]. Dabei werden Fragen nach Lagersystemleistungen aufgeworfen, welche sich unter Kombinationen von mehreren Lagerstufen (Kaskadierung), mehrfachtiefer Lagerung, mehreren Lastaufnahmemitteln und mehreren Geräten pro Gang einstellen (s. Abschnitt 4.4). Diese Fragen sind derzeit noch Gegenstand der Forschung.
6. Durch umfangreiche Detailplanungen zur Erschließung der letzten Leistungsreserven entstehen Aufwände, welche die erhöhten Investitionen bei Wahl von Ausrüstung einer höheren Leistungsklasse übersteigen können. Dabei würde letzteres die deutlich flexiblere und robustere Lösung darstellen.

In dieser Situation ist die Verfügbarkeit von einfachen, leistungsfähigen Strategien, welche ohne umfangreiche Datenanalyse, Planungen und Berechnungen auskommen, von besonderem Nutzen. Diese können ein Optimum zwar genausowenig erreichen wie komplexere Strategien, reduzieren aber zumindest die Anzahl der offenen Fragen und festzulegenden Parameter.

Die in den Kapiteln 5 und 6 vorgestellte Dynamische Zonierung weist nicht nur Vorteile beim Betrieb auf, sondern reduziert auch die Komplexität der Lagerplanung.

4. Schnellläuferstrategien

Schnellläuferstrategien sind eine Klasse von Belegungsstrategien, welche durch möglichst günstige Wahl von Ein- und Auslagerorten versuchen, den Lagerdurchsatz zu steigern. Dabei wird ausgenutzt, dass Lagereinheiten unterschiedlich lange im Lager verweilen. Lagereinheiten mit kurzen Verweildauern werden auf möglichst gut zu erreichenden Lagerplätzen gelagert und umgekehrt.

Der Einsatz von Schnellläuferstrategien erfordert die Analyse des Sortimentes hinsichtlich des Durchsatzes und der gelagerten Mengen von Artikeln bzw. Lagereinheiten, um Rückschluss auf die Verweildauern zuzulassen. Klassischerweise unterteilt man das Sortiment im Rahmen einer ABC-Analyse in verschiedene Gruppen. Die Basis für diese Artikelgruppierung bilden die Umschlagsraten oder Gängigkeiten der einzelnen Artikel, welche jeweils als Quotient aus Durchsatz und mittlerer gelagerter Menge bestimmt werden. Der Kehrwert der Umschlagsrate ist die mittlere Verweildauer der Lagereinheiten eines Artikels. Artikel mit hoher Umschlagsrate nennt man auch Schnelldreher, diejenigen mit niedriger Umschlagsrate Langsamdreher.

Die Artikelgruppen werden im Lager verschiedenen Gruppen von Stellplätzen zugeordnet. Diese Gruppen von Stellplätzen nennt man Zonen. Der Schwerpunkt herkömmlicher Schnellläuferstrategien liegt auf der optimalen Bestimmung der Anzahl, Form, Größe, Grenzen und zuzuordnenden Umschlagsraten dieser Zonen.

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen der Schnellläuferstrategien dargestellt. Die Literatur zu Schnellläuferstrategien wird besprochen und ein Versuch zur Systematisierung der Schnellläuferstrategien unternommen.

4.1. Mittlere Fahrzeit und Spielzeit

Die überwiegende Mehrheit aller Stückgutlager nutzt statische Lagerung mit Unstetigförderern als Transportmittel im Lager. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf eine solche Konfiguration.

Das Ziel jeder Schnellläuferstrategie ist ganz allgemein, die Grenzleistung des Lagers zu erhöhen (s. auch Abschnitt 3.2 auf Seite 26). Diese Grenzleistung soll vereinfachend auch als Lagerleistung bezeichnet werden.

Die Lagerleistung hat nicht nur Einfluss auf die bewegbare Anzahl von Lagereinheiten sondern auch auf die Auftragsausführungszeit im System. Mit Annäherung des Auslastungsgrades, also des Quotienten aus Leistungsanforderung und Grenzleistung, an 100%, steigt die Anzahl der wartenden Aufträge überproportional an. Die Auftragsausführungszeit ist zu dieser Größe direkt proportional.

4. Schnellläuferstrategien

Die Lagerleistung wird hauptsächlich durch die Transportmittel im Lager bestimmt. Gelingt es, die zeitliche Nutzung dieser Ressource durch die einzelnen Lagereinheiten zu vermindern, steigt die Lagerleistung.

Die Wahl des Einlagerortes bestimmt, welche Fahrzeiten während der Ein- und der Auslagerung entstehen. Dies ist der Zeitanteil der Transportprozesse im Lager, welcher von Spiel zu Spiel durch die Wahl des Ein- bzw. Auslagerortes variabel ist. Als mittlere Fahrzeit zu den Lagerplätzen in einem Lager mit Kapazität N ist ganz allgemein

$$\overline{t_F} = \sum_{k=1}^N t_{Fk} p_k \quad (4.1)$$

zu erwarten. Dabei ist p_k die Wahrscheinlichkeit, dass am Lagerort k eine Lageroperation stattfindet, t_{Fk} die Fahrzeit zu diesem Lagerort. Die mittlere Fahrzeit ist deshalb ein mit den Lagerortzugriffswahrscheinlichkeiten gewichtetes arithmetisches Mittel der Fahrzeiten. Zusammen mit den fixen Spielzeitanteilen t_{fix} ergibt sich daraus die *Spielzeit* t_{SP} , welche wiederum die Grenzleistung γ in Lagerspielen pro Zeiteinheit festlegt.

$$t_{SP} = t_{fix} + 2\overline{t_F} \quad (4.2)$$

$$\gamma = \frac{1}{t_{SP}} \quad (4.3)$$

Die Lagerleistung wird somit, abgesehen von den fixen Zeitanteilen, determiniert durch Produkte von Fahrzeiten mit den Wahrscheinlichkeiten ihres Auftretens.

Schnellläuferstrategien müssen während des Lagerbetriebes günstige, am besten optimale Kombinationen von Zugriffswahrscheinlichkeiten und Fahrzeiten realisieren. Die Fahrzeitformel (4.1) berechnet das Skalarprodukt des Vektors der Fahrzeiten und des Vektors der Zugriffswahrscheinlichkeiten. HARDY *et al.* bewiesen, dass das Skalarprodukt zweier Vektoren dann minimal ist, wenn die Koeffizienten der Vektoren umgekehrt monoton geordnet sind¹ [HLP52, S. 261]. Das bedeutet für die Optimalität einer Zuordnung, dass an nach aufsteigender Fahrzeit geordneten Lagerorten monoton nicht-steigende Zugriffswahrscheinlichkeiten realisiert werden müssen.

Die folgenden beiden Abschnitte befassen sich mit den beiden Einflussfaktoren auf die Lagerleistung: den Fahrzeiten und den Zugriffswahrscheinlichkeiten.

¹„If (a) and (b) are given except in arrangement then $\sum ab$ is [...] least when they are monotonic in opposite senses;“ [HLP52, S. 261]

4.2. Fahrzeitverteilung

4.2.1. Allgemeine Darstellung

Fahrzeiten im Lager werden durch die Lagergeometrie und die Leistungsfähigkeit der Transportmittel festgelegt. Sie können während des Lagerbetriebes als konstant angesehen werden. Bei den Fahrzeiten sollen zunächst entweder Ein- oder Auslagerfahrzeiten betrachtet werden. Da in einem Einzelspiel die Fahrzeit für Hin- und Rückweg als gleich angesehen werden kann, ist die Betrachtung der Fahrzeit jeweils nur einer Strecke ausreichend. Man erhält so einen Fahrzeitvektor mit der Anzahl Fahrzeiten als Koeffizienten, welche der Anzahl der Lagerorte, der Lagerkapazität N , entspricht. Für die weiteren Betrachtungen ist es zweckmäßig, die verschiedenen Fahrzeiten als nach aufsteigender Fahrzeit geordnete Liste aufzufassen. Der Lagerort $k = 1$ weist so die kürzeste Fahrzeit und der Lagerort $k = N$ die längste Fahrzeit auf.

Diese Fahrzeiten t_{F1}, \dots, t_{FN} der einzelnen Lagerplätze im Lager lassen sich nun als empirische Verteilungsfunktion interpretieren. Dabei sei $m(t_F)$ die Anzahl aller Fahrzeiten, welche kleiner als t_F sind. Dann ist

$$F(t_F) = P(T_F < t_F) = \frac{m(t_F)}{N}$$

die Fahrzeitverteilung. Diese Funktion hat die Fahrzeiten t_{Fk} als Sprungstellen und $\frac{1}{N}$ als Sprunghöhen, wobei mehrere Sprünge an einer Stelle mit entsprechend vergrößerter Sprunghöhe zusammenfallen können.

Ihre diskrete Verteilungsdichte lautet

$$f(t_{Fk}) = \frac{1}{N} \quad (4.4)$$

mit einem Erwartungswert von

$$E(t_F) = \sum_{k=1}^N t_{Fk} f(t_{Fk}) . \quad (4.5)$$

Jeder Fahrzeit wird in dieser Berechnung die gleiche Wahrscheinlichkeit zugeordnet, was einem Lagerbetrieb ohne Belegungsstrategien entspricht. Die Wahrscheinlichkeit p_k aus Gleichung (4.1) und $f(t_{Fk})$ sind identisch und konstant. Damit sind auch die Gleichungen (4.1) und (4.5) identisch und degenerieren zum einfachen arithmetischen Mittel der Einzelfahrzeiten. Die mittlere Fahrzeit wird ausschließlich durch diese bestimmt.

Für allgemeingültige Aussagen ist die diskrete Betrachtung der Fahrzeiten schlecht geeignet. Für jeden einzelnen Lagerort müssen diskrete Fahrzeiten bestimmt werden. Diese werden von Einsatzfall zu Einsatzfall unterschiedlich in Anzahl und Ausprägung sein. Es ist offensichtlich, dass die Berechnung und Verwaltung tausender Fahrzeiten zwar im einzelnen Einsatzfall möglich und sinnvoll sein wird, für allgemeingültige Aussagen jedoch nicht effizient ist.

Die Lösung für dieses Problem besteht darin, zu einer kontinuierlichen Betrachtung von

4. Schnellläuferstrategien

Fahrwegen, Indizes und Fahrzeiten überzugehen. Aus den diskreten Fahrzeiten t_{Fk} wird dadurch eine kontinuierliche Fahrzeitfunktion $t_F(k)$. Die Funktion $F(t_F(k))$ ist nun kontinuierlich über dem Intervall zwischen minimaler und maximaler Fahrzeit. Sie resultiert aus ebenfalls kontinuierlichen Fahrwegen zwischen minimalem und maximalem Fahrweg.

Um die Allgemeingültigkeit der Aussagen weiter zu verbessern, werden die maximalen Fahrwege normiert. Nach geeigneter Wahl der Zeiteinheit liegen auch die auftretenden Fahrzeiten im Intervall $[0, 1]$. Diese Betrachtungsweise geht auf HAUSMAN, GRAVES und SCHWARZ zurück [HSG76, S. 632]. Auch die Konvergenz von diskretem und kontinuierlichem Fall wurde nachgewiesen².

Bei identischen Zugriffswahrscheinlichkeiten wird nun die mittlere Fahrzeit auf einfache Weise präzise berechenbar:

$$\overline{t_F} = \int_0^1 k \frac{dF(t_F(k))}{dk} dk \quad (4.6)$$

Als einfaches Beispiel soll die Bedienung eines linienförmigen Lagers der Länge L durch einen Verteilwagen mit Übergabe und Übernahme von Lagereinheiten an einer Randposition dienen. Durch die kontinuierliche Betrachtungsweise und die Normierung werden aus Fahrwegen im Intervall $[0, L]$ Fahrwege im Intervall $[0, 1]$ und die auftretenden Fahrzeiten liegen statt im Intervall $[0, t_F(L)]$ ebenfalls im Intervall $[0, 1]$. Bei Vernachlässigung von Beschleunigung und Verzögerung gilt dann $t_F(k) = k$. Aus (4.6) folgt $\overline{t_F} = \frac{1}{2}$. Eine Rückübertragung dieser Aussage auf die unnormierte Ausgangssituation bereitet keine Schwierigkeiten.

4.2.2. Fahrzeiten in Regallagern

Für die Berechnung von Regallagern muss noch ein weiterer Aspekt einbezogen werden. Die Transportmittel in diesen weisen meist zwei voneinander unabhängig arbeitende Antriebe auf, welche gleichzeitig genutzt werden (Hubwerk, Fahrwerk). Deshalb müssen zwei von einander unabhängige Fahrzeiten $t_F(k_x)$ und $t_F(k_y)$ betrachtet werden, deren größere die Fahrzeit zum Lagerort bestimmt.

$$F(t_F) = P(\max[t_F(k_x), t_F(k_y)] \leq t_F) \quad (4.7)$$

$$= P(t_F(k_x) \leq t_F) \cdot P(t_F(k_y) \leq t_F) \quad (4.8)$$

Sind die maximalen Fahrzeiten in x- und y-Richtung gleich groß, lassen sich auch diese durch Wahl der Zeiteinheit in das Intervall $[0, 1]$ abbilden.

Im Grundmodell befindet sich der Übernahme- und Übergabepunkt (I/O-Punkt) an einer Ecke der zu bedienenden Fläche [HSG76] und maximalen Fahrzeiten von Hub- und Fahrwerk sind identisch.

Die Fahrzeit zu Lagerplätzen am Perzentil k der Fahrzeit beträgt

$$t_F(k) = \sqrt{k}. \quad (4.9)$$

²[HSG76] verweisen auf ein heute nicht mehr verfügbares Arbeitspapier. Die Zulässigkeit der kontinuierlichen Approximation gehört heute zum Allgemeingut.

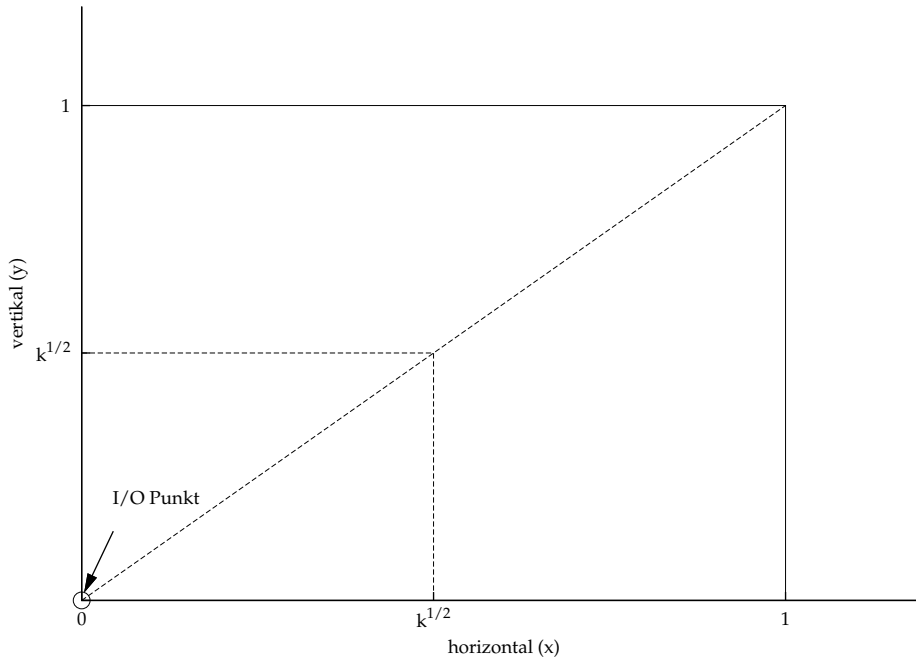


Abbildung 4.1.: Kontinuierliche Darstellung der Fahrzeit – Square-In-Time

Abb. 4.1 stellt diese Situation dar und macht die Herkunft der englischen Bezeichnung *square-in-time* deutlich. Die deutsche Entsprechung ist ein Lager mit Formfaktor³ $f = 1$. Bei Ansatz dieser Fahrzeitfunktion in Gleichung (4.6) ergibt sich das bekannte Ergebnis einer mittleren Fahrzeit von $\frac{2}{3}$.

Diese Einzelspiel-Fahrzeiten bilden nach wie vor die Basis für Schnellläuferstrategien. Für Doppelspiele haben GRAVES *et al.* versucht, die Fahrzeit zwischen Lastabgabe und Lastaufnahme im Lager zu minimieren [GHS77, S. 942]. Dazu wurden auch unkonventionelle Zonierungen gewählt. Dennoch konnte dadurch kein positiver Effekt auf die Lagerleistung erzielt werden. Dabei ist es bis heute geblieben⁴.

4.2.3. Erweiterte Fahrzeitdefinition

Für die Bewertung von Schnellläuferstrategien bietet sich an, die Fahrzeiten aus einem etwas anderen Blickwinkel zu betrachten, als dies bei der klassischen Spielzeitberechnung der Fall ist.

Jede einzelne Lagereinheit nimmt während des Lagerprozesses die Ressource Transportmittel notwendigerweise mindestens zweimal in Anspruch, nämlich einmal bei ihrer Einlagerung und einmal bei ihrer Auslagerung, wobei es sich nicht um das *selbe* Transportmittel handeln muss. Die Wahl eines Lagerortes zur Minimierung des Ressourcenverbrauchs darf deshalb

³Der Formfaktor berechnet sich aus $f = \frac{L_x}{L_y} \cdot \frac{v_y}{v_x} = \frac{t_{Fx}}{t_{Fy}}$.

⁴Die Ausführung von Doppelspielen sowie die gezielte Auswahl von Auslageraufträgen dafür zählen zu den Bewegungsstrategien und sind von der Form der Zonenbildung unabhängig.

4. Schnellläuferstrategien

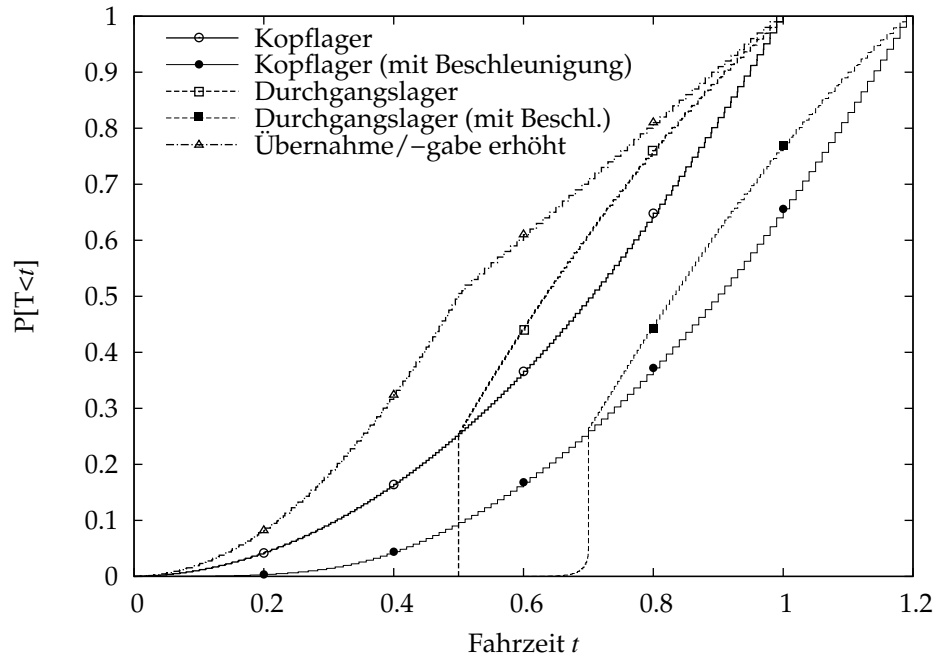


Abbildung 4.2.: Fahrzeitverteilungen verschiedener Regallager (100×100 Stellplätze)

nicht auf Basis einer einfachen Spielzeitbetrachtung erfolgen, da Ein- und Auslagerung i.d.R. in verschiedenen Arbeitsspielen ausgeführt werden. Eine Verringerung der Einlagerzeit auf Kosten der Auslagerzeit oder umgekehrt ist für die Erhöhung der dauerhaften Lagerleistung nutzlos. Stattdessen ist die Summe von Einlager- und Auslagerzeit der einzige Anteil des Ressourcenverbrauchs durch eine Lagereinheit, welcher durch die Lageroperation selbst, konkret durch die Wahl des Lagerortes, beeinflussbar ist. Diese Summe der Fahrzeiten vom Übernahme- und vom Lagerort zum Übergabepunkt soll Fahrzeit t_{Fk} des Lagerortes k genannt werden⁵:

$$t_{Fk} = t_{Fk\text{Einlagerung}} + t_{Fk\text{Auslagerung}}$$

Selbstverständlich „fährt“ hier nicht der Ort im Lager. Diese Sprachregelung vermeidet lediglich die ständige Differenzierung zwischen Ein- und Auslagerungen und damit zwischen Fahrten von und zu einem Lagerort. Diese wäre notwendig, da keine Spielzeiten im klassischen Sinne berechnet werden. Genauso könnte auch das arithmetische Mittel von Ein- und Auslagerzeit angesetzt werden, was aber wiederum nur die Einführung eines konstanten Faktors bedeutete und keinen Einfluss auf die Fahrzeitverteilung hat.

Mit dieser Fahrzeitdefinition wird die potentiell unterschiedliche Lage von Übergabe- und Übernahme- und Übergabepunkt in das Kalkül der Schnellläuferstrategien einbezogen. Abbildung 4.2 veranschaulicht verschiedene Fahrzeitverteilungen, wenn Übergabe- und Übernahme- und Übergabepunkt an einem (Kopflager) oder an verschiedenen (Durchgangslager) Enden einer Regalgasse liegen. Beim Durchgangslager fehlen kurze Fahrzeiten, wodurch solche Lager *per se* weniger Opti-

⁵Diese Form der Fahrzeitdefinition wurde von VAN DEN BERG und GADEMANNS erstmals (kommentarlos) erwähnt [vdBG00, S. 1343].

mierungspotential durch Schnellläuferstrategien bieten.

Komplexe geometrische Zonenbildungsverfahren, wie z. B. in [AHV⁺01] oder [LBA01] beschrieben, können durch die angepasste Fahrzeitdefinition vermieden werden.

4.3. Fachzugriffshäufigkeit

4.3.1. Entstehung

Der Faktor p_k in Gleichung (4.1) beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass an Lagerort k eine Lageroperation ausgeführt wird. Diese Wahrscheinlichkeit wird im Folgenden (Fach-)Zugriffswahrscheinlichkeit genannt und kann auch als relative Fachzugriffshäufigkeit aufgefasst werden.

Aus Gleichung (4.1) folgt dann, dass wenn alle Fahrzeiten identisch sind, keinerlei Optimierungspotential durch die Beeinflussung der p_k und mithin durch Schnellläuferstrategien besteht. Da sich die Zugriffswahrscheinlichkeiten immer zu 1 addieren, lautet die mittlere Fahrzeit $\bar{t}_F = t_F$ wegen $\bar{t}_F = \sum_{k=1}^N t_F p_k = t_F \sum_{k=1}^N p_k$ mit $\sum_{k=1}^N p_k = 1$ const. Praktisch tritt eine solche Situation z. B. in einem durch einen Verteilwagen bedienten Durchgangslager auf. Nach der Fahrzeitdefinition des vorhergegangenen Abschnitts ist diese im Beispielfall mit $t_{Fk} = t_{FkEinlagerung} + t_{FkAuslagerung} = 1$ konstant. Eine verkürzte Einlagerzeit führt zu einer verlängerten Auslagerzeit und umgekehrt.

Ohne besondere Belegungsstrategien wird meist davon ausgegangen, dass die Zugriffswahrscheinlichkeiten mit $p_k = \frac{1}{N}$ überall gleich sind. Die Zugriffe sind auf die Lagerorte gleich verteilt. Diese Annahme könnte dadurch berechtigt sein, dass bei Anwendung einer Gleichverteilungsstrategie die Zugriffe auf alle benutzten Plätze tatsächlich gleich verteilt sind. Sobald auch nur teilweise eine Zonierung der Lagerplätze erfolgt, ist eine Gleichverteilung der Zugriffe auf die Lagerorte äußerst unwahrscheinlich. Dennoch wird die Annahme der Gleichverteilung trotzdem häufig getroffen, da die analytische Leistungsbestimmung für Lager auf diese Weise deutlich vereinfacht wird.

Zielrichtung einer Schnellläuferstrategie muss nun sein, sich die Ungleichverteilung der Zugriffswahrscheinlichkeiten zunutze zu machen. Dazu gilt es, die Häufigkeit der Zugriffe auf Lagerorte mit kurzer Fahrzeit zu erhöhen und umgekehrt die Plätze mit langen Fahrzeiten seltener zu besuchen. Die optimale Schnellläuferstrategie wird Lagereinheiten zu Lagerorten so zuordnen, dass am Lagerort mit der geringsten Fahrzeit die maximal erreichbare Zugriffshäufigkeit und am Platz mit der höchsten Fahrzeit die minimale mögliche Zugriffshäufigkeit realisiert wird. Die Zugriffshäufigkeiten sinken vom Platz mit der geringsten Fahrzeit zum Platz mit der höchsten Fahrzeit hin. Jegliche Vertauschung von Zugriffswahrscheinlichkeiten durch Vertauschung aller zugeordneten Lagereinheiten führt zu einer Zunahme der mittleren Fahrzeit.

Beweis Die Lagerorte k seien nach aufsteigender Fahrzeit t_{Fk} geordnet. Dann dürfen die diesen Lagerorten zugeordneten Zugriffswahrscheinlichkeiten p_k nicht steigen, damit

4. Schnellläuferstrategien

die mittlere Fahrzeit minimal sein kann. Dazu muss gelten

$$t_{Fk}p_k + t_{Fk+1}p_{k+1} \leq t_{Fk}p_{k+1} + t_{Fk+1}p_k \quad (4.10)$$

$$t_{Fk+1} = t_{Fk} + \epsilon_1 \quad (4.11)$$

$$p_{k+1} = p_k - \epsilon_2. \quad (4.12)$$

Alle Zeiten und Wahrscheinlichkeiten sind stets > 0 , ebenso wie ϵ_1 und ϵ_2 stets ≥ 0 sind. Dann folgt

$$t_{Fk}p_k + (t_{Fk} + \epsilon_1)(p_k - \epsilon_2) \leq t_{Fk}(p_k - \epsilon_2) + (t_{Fk} + \epsilon_1)p_k \quad (4.13)$$

$$2t_{Fk}p_k + \epsilon_1p_k - \epsilon_2t_{Fk} - \epsilon_1\epsilon_2 \leq 2t_{Fk}p_k + \epsilon_1p_k - \epsilon_2t_{Fk} \quad (4.14)$$

$$-\epsilon_1\epsilon_2 \leq 0 \quad (4.15)$$

q. e. d.

Um mit den Zugriffshäufigkeiten bzw. den Zugriffswahrscheinlichkeiten auf die Lagerorte rechnen zu können, müssen diese bestimmt werden. Die Zugriffswahrscheinlichkeiten der einzelnen Lagerorte werden durch die Verweildauern der auf ihnen gelagerten Lagereinheiten determiniert.

Die Zugriffshäufigkeit h_k ist der Quotient aus dem Betrachtungszeitraum und der mittleren Verweildauer \bar{t}_k der in diesem Zeitraum dort gelagerten Lagereinheiten⁶.

$$h_k = \frac{1}{\bar{t}_k} \quad (4.16)$$

Auch die Vertauschung zweier *einzelner* ursprünglich optimal zugeordneter Lagereinheiten führt zu einer Verschlechterung der mittleren Fahrzeit. Erstens sinkt die Zugriffshäufigkeit an der fahrzeitgünstigeren Stelle und umgekehrt. Zweitens beansprucht die Lagereinheit mit der größeren Verweildauer an der fahrzeitgünstigeren Stellen Lagerkapazität über einen längeren Zeitraum. Das führt dazu, dass gänzlich andere Lagereinheiten zwischen den Vertauschungs-orten tendenziell an Lagerorten mit höherer Fahrzeit gelagert werden müssen.

Am Platz mit der günstigsten Fahrzeit werden Lagereinheiten mit den kürzesten Verweildauern gelagert. Diese Lagereinheiten geben wegen ihrer geringen Verweildauer den Lagerort bereits nach kurzer Zeit wieder frei. Dieser steht dann für die nächste Lagereinheit und damit weitere Lageroperationen bzw. Fachzugriffe zur Verfügung. Auf den Plätzen mit den ungünstigsten Fahrzeiten werden die Lagereinheiten mit den größten Verweildauern gelagert. Durch die langen Liegezeiten finden Lageroperationen an diesen Orten sehr selten statt. Aufgrund des fluktuierenden Lagerbestandes wird auf diesen Lagerplätzen über längere Zeiträume gar keine Lagereinheit gelagert sein, was gleichzeitig das Fehlen von Lageroperationen und damit Zugriffshäufigkeit 0 bedeutet.

Für eine *a-priori*-Bestimmung der Lagerleistung muss ein Weg gefunden werden, die Zugriffshäufigkeiten aus den Informationen über das Sortiment herzuleiten. Letztendlich muss

⁶Genaugenommen ist die *absolute* Zugriffshäufigkeit das Doppelte davon, da pro Zuordnung einer Lagereinheit immer zwei Lageroperationen an diesem Ort stattfinden. Da dies aber für alle Lagerorte gilt und nur die *relative* Häufigkeit von Interesse ist, kann diese Konstante außer Acht gelassen werden.

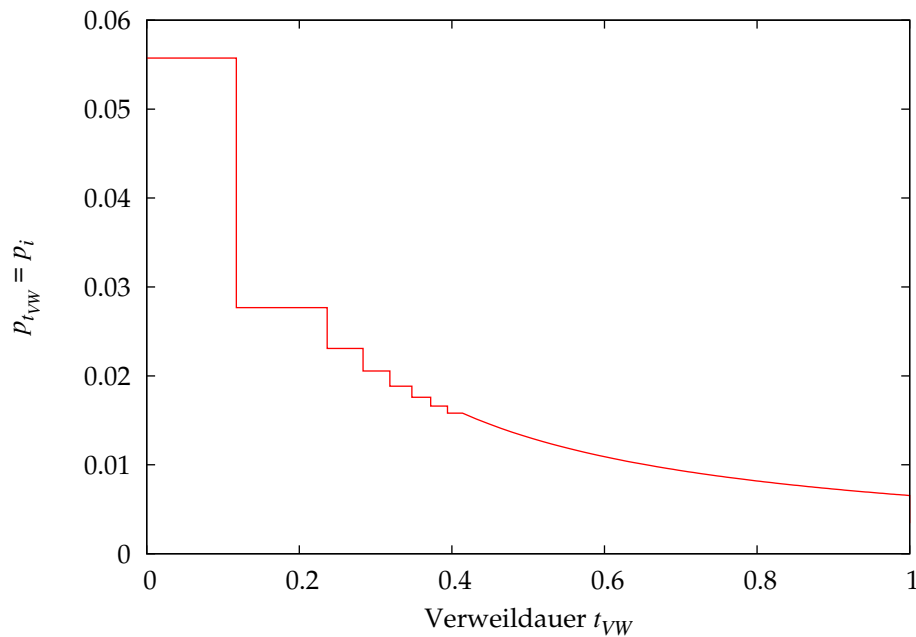


Abbildung 4.3.: Verweildauerdichte eines 20/60-verteilten Sortimentes mit 100 Artikeln (normiert, unskaliert)

die Verweildauer jeder einzelnen Lagereinheit pro Lagerort im Voraus bestimmt werden.

4.3.2. Verweildauerverteilung

Die Verweildauer jeder einzelnen Lagereinheit und damit die Verweildauerverteilung lässt sich aus den Informationen über das gesamte Sortiment herleiten. Die Durchsätze der einzelnen Artikel in Verbindung mit den angewendeten Dispositionsstrategien ermöglichen die Bestimmung der Anzahl gelagerter Lagereinheiten pro Artikel. Mit Hilfe von LITTLES Gesetz können dann auch die (mittleren) Verweildauern der Lagereinheiten berechnet werden [Lit61]. Abbildung 4.3 stellt die Verweildauerverteilung in einem Sortiment mit 100 Artikeln dar⁷. Die Verweildauern wurden in vom Intervall $[0, 12.5]$ in das Intervall $[0, 1]$ abgebildet. Dabei wurde die Dichte nicht skaliert. Dadurch ist keine eigentliche Dichtefunktion dargestellt, aber die Wahrscheinlichkeit, dass eine beliebige Lagereinheit im Lager zu Artikel i gehört, kann direkt abgelesen werden.

Die Verweildauerverteilung ist gleich aus zwei Gründen zentral für die Bestimmung der mittleren Fahrzeit. Aus ihr muss nicht nur auf die Umschlagsraten und damit die Zugriffswahrscheinlichkeiten geschlossen werden, sondern auch darauf, an welchen Lagerorten und mithin welchen Fahrzeiten diese realisiert werden. Diese Orte werden durch die Lagerkapazitätsausschöpfung der Lagereinheiten bestimmt. Dabei sollte die Lagerkapazität besser

⁷Worum es sich bei einer „20/60“-Verteilung handelt, wird in Abschnitt 5.4.2 und Abbildung 5.6 auf Seite 71 definiert.

4. Schnellläuferstrategien

Lagerzeitkapazität heißen. Ob nämlich 10 Lagereinheiten für eine Zeiteinheit oder eine Lagereinheit für 10 Zeiteinheiten Lagerkapazität belegen, führt zur gleichen Ressourceninanspruchnahme. Bei größerer Artikelanzahl ist durch den Ausgleich der gelagerten Mengen auch nicht mehr relevant, ob diese Lagereinheiten gleichzeitig gelagert werden. Die Äquivalenz von Lagermenge und Lagerzeit bildet die Grundlage für die in Abschnitt 5.4.3 auf Seite 72 vorgestellten Leistungsberechnungen.

Die wahre Verweildauerverteilung ist nur theoretisch verfügbar. Sie baut auf praktisch nicht verfügbaren Informationen auf und erfordert Abstimmungen mit der Disposition in praktisch nicht vertretbarem Ausmaß. In Abschnitt 5.3.1 wird ein Weg aufgezeigt, die Verweildauerverteilung dennoch näherungsweise zu bestimmen.

4.4. Literatur

4.4.1. Einleitung

Die Literatur zum Thema Lagerstrategien im Allgemeinen und zu Schnellläuferstrategien im Besonderen ist außerordentlich umfangreich. Allerdings ist die rückblickende, vollständige Bewertung der Literatur zum Thema heute schwer geworden. Manche Arbeiten werden zwar oft zitiert, sind aber praktisch nicht mehr verfügbar. Oft zitieren Autoren auch aus eigenen Arbeitspapieren, welche sie auf Nachfrage zur Verfügung stellen wollen. Mangels Verfügbarkeit der Autoren ist dies heute oft nicht mehr möglich und Kommunikationsversuche schlagen fehl. Dennoch lassen sich wegen der Vielzahl der Arbeiten Inhalte rekonstruieren.

Mehrere Beiträge befassen sich bereits mit der Einordnung, Zusammenfassung und chronologischen Aufarbeitung bestehender Veröffentlichungen [Cor97, Gra98, vdB99]. Trotz des Umfangs der Untersuchungen zu Schnellläuferstrategien fand aber eine Systematisierung bisher nicht statt. Ordnungskriterien für Schnellläuferstrategien und deren Abhängigkeiten untereinander werden entweder gar nicht, unvollständig bzw. zusammenhanglos oder lediglich implizit benannt und angewendet. Oft werden mit den gleichen Begriffen verschiedene Dinge bezeichnet.

Eine Ursache dafür sind vielfach Missverständnisse. Immer wieder finden sich in den Einleitungen von Veröffentlichungen Sätze wie dieser:

„It is routinely accepted that there are three ways of assigning products to storage locations in warehouses: random storage, class-based storage and dedicated storage.“⁸[AHBW02]

Allein in dieser oberflächlich unverfänglichen Aussage ist großes Potential für Missverständnisse verborgen. Die Aufzählung ist zwar einzig sinnvoll analog zu Abschnitt 4.5.2 auf Seite 47 in Bezug auf die Zonenanzahl zu interpretieren. Jeder einzelne Punkt kann aber auf verschiedene Art und Weise verstanden werden. Dieses gilt sowohl für die Englische als auch für die Deutsche Sprache, wenn auch auf unterschiedliche Weise.

⁸„Es ist allgemein anerkannt, dass es 3 Möglichkeiten gibt, Produkte zu Lagerorten in Lagern zuzuordnen: zufällige Zuweisung, klassenbasierte Zuweisung und feste Zuweisung.“

- „random storage“ ist keine eindeutige Bezeichnung für eine Belegungsstrategie. Es wird offen gelassen, ob eine zufällige Auswahl aller freien Plätze mit gleicher Wahrscheinlichkeit erfolgt, oder irgendein freier Lagerplatz gewählt wird. Dies erlaubt auch die Kürzeste-Fahrzeit-Strategie, obwohl deren Ergebnisse von den Ergebnissen der Gleichverteilungsstrategie abweichen (s. Abschnitt 5.5.3.4 auf Seite 88). Letzteres ist nicht allgemein bekannt, weshalb oft angenommen wird, „random“ wäre eine eindeutige Beschreibung. YOON und SHARP [CS91, S. 9] konstatieren gar „random“ sei strikt „Closest-open-Location“, also kürzeste Fahrzeit. „Random“ könnte statt mit „zufällig“ auch mit „frei“ oder „chaotisch“ übersetzt werden, obwohl diese Begriffe nicht vollständig kongruent sind.
- „class-based“ erfordert zur eindeutigen Beschreibung die Angabe zahlreicher Parameter.
- „dedicated storage“ ist nicht notwendigerweise der Widerpart zu „random storage“. „dedicated storage“ kann auch als Gegenteil von „shared storage“ auftreten. Das Begriffspaar „dedicated“ und „shared“ kann deshalb sowohl als „feste“ bzw. „freie“ oder auch als „exklusive“ oder „nicht-exklusive“ Zonenzuordnung verstanden werden (s. Abschnitt 4.5.3).

In dieser Situation kann man lediglich aufgrund einschlägiger Vorbildung zu einer eigenen konsistenten Interpretation kommen, welche sich aber von der Vorstellung anderer Leser unterscheiden kann.

Eine weitere Ursache für die verschiedenen Interpretationen, welche selbst Fachleute von Schnellläuferstrategien haben, könnte die sehr unterschiedliche fachliche Herkunft der Autoren sein. Diese sind u. a. Mathematiker in der Operationsforschung, Ingenieure oder Wirtschaftswissenschaftler. Dies würde auch die sehr unterschiedlichen Beschreibungsverfahren, Symboliken, Begrifflichkeiten und impliziten Annahmen erklären. Letztlich wird die Annäherung an das Fachgebiet erschwert. Eine zielgerichtete Bewertung und Auswahl geeigneter Strategien auf Basis der Literatur ist so recht mühsam, wenn nicht für den Praktiker unmöglich. Es verwundert deshalb nicht, dass bei der Implementierung von Steuerungsverfahren der Stand der Wissenschaft nicht immer Berücksichtigung findet, obwohl ein erheblicher Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Systeme anerkannt ist und über 90% der am Markt befindlichen Lagerverwaltungssysteme Zonierungen anbieten [Fig00]. Diese werden auch zunehmend nachgefragt [tHW01, S. 124].

Umgekehrt lässt sich nur schwer feststellen, welche Schnellläuferstrategie in praktischen Einsatzfällen tatsächlich angewendet wird. Betreiber von Lagersystemen benötigen erfahrungsgemäß eine Zeit der Recherche, um die Konfiguration ihrer Lagerstrategie festzustellen, obwohl deren Kenntnis für effizienten Lagerbetrieb notwendig wäre. Ebenso hindert, dass die Konfiguration der Strategie oft als Geschäftsgeheimnis betrachtet wird. Als Folge davon sind auch in aktuellen und permanent gepflegten Untersuchungen zum Einsatz automatisierter Lager Informationen zu eingesetzten Strategien nicht auf eine Weise enthalten, die Einblick oder gar Bewertung ermöglicht⁹.

⁹Für Lagerverwaltungssysteme und automatisierte Lager existieren zwei umfangreiche Datenbanken. Aus der vom Fraunhofer IML in Dortmund durchgeführten Marktstudie zu Lagerverwaltungssoftware können keine

4.4.2. Etablierung des CPO-Kriteriums

Die Suche nach der durchsatzoptimalen Belegungsstrategie in Lagern ist älter als automatisierte Lager. Auch vor Automatisierung der Lager bestand das Problem der durchsatzoptimalen Zuordnung von Artikeln zu Lagerbereichen, da auch in manuell bedienten Lagern für den Transport ausreichend Ressourcen, sprich Arbeitskräfte, bereitgestellt werden müssen.

Für einen wirtschaftlichen Lagerbetrieb galt und gilt das ökonomische Prinzip mit gegebenen Ressourcen maximale Leistung zu erzielen oder umgekehrt eine vorgegebene Leistung unter Einsatz minimaler Ressourcen zu erbringen. Um dem Rechnung zu tragen, wurden intuitiv zwei verschiedene Ordnungskriterien eingesetzt [KL76]. Das erste Kriterium basiert auf der zugriffsgünstigen Anordnung der Artikel mit geringen gelagerten Volumen. Auf diese Weise ist eine größere Anzahl Artikel auf kurzen Wegen zu erreichen. Das zweite Kriterium ordnet nach der Zugriffshäufigkeit auf einen Artikel, um so eine Vielzahl von Zugriffen an günstigen Lagerorten zu erzielen. Erfahrungsgemäß sind beide Verfahren auch heute noch im praktischen Einsatz. Dieser Umstand lässt sich nur mit der spontanen Eingängigkeit dieser Kriterien erklären. Optimal ist keines der beiden Kriterien.

Angesichts der praktischen Relevanz einer wirtschaftlichen Stellplatzzuordnung begann die Operationsforschung nach empirischer Betrachtung der bestehenden Verfahren, theoretische Grundlagen für die Stellplatzzuordnung zu suchen. HESKETT schlug 1963 den Cube-Per-Order-Index als Anordnungskriterium vor [Hes63, Hes64]¹⁰. Er erhob nicht den Anspruch der Optimalität dieses Kriteriums, sondern illustrierte dessen Eignung anhand von Zahlenbeispielen. Der Cube-Per-Order-Index (CPO, mitunter auch als COI) wird als Quotient aus dem von der Lagereinheit beanspruchtem Lagervolumen und der Zugriffshäufigkeit darauf gebildet. Die Stellplätze werden mit dem günstigsten Stellplatz beginnend Artikeln mit aufsteigenden CPO-Indizes zugeordnet. Das CPO-Kriterium wurde von MALETTE und FRANCIS als tatsächlich optimal nachgewiesen [MF72]. Allerdings beziehen sich MALETTE und FRANCIS nicht direkt auf HESKETT und nutzen auch den Term „CPO-Index“ nicht. KALLINA und LYNN führten das Zuordnungsproblem auf eine lineare Optimierung zurück und wiesen so die Optimalität des CPO-Kriteriums nach [KL76]. Sie wiesen auch darauf hin, dass ein automatisiertes Lager mit Lagereinheiten gleicher Größe lediglich ein einfacherer Sonderfall für die Anwendung des Kalküls ist. Bei identischen Fachgrößen („cube“) und auf eine Lagereinheit pro Fach bezogene Zugriffe („order“) erfolgt die Zuordnung nach CPO entsprechend fallender Fachzugriffshäufigkeit. Der Nachweis der Eignung des CPO-Kriteriums wurde durch MALBORG und KRISHNAKUMAR auf Lagerkosten verallgemeinert [MK87]. Der Beweis der Optimalität des CPO-Kriteriums wurde von ihnen auch für Doppelspiele erbracht.

Informationen zu Art und Umsetzung der jeweils eingesetzten ABC-Zonierung abgeleitet werden. Auch die vom Institut für rechnerunterstützte Produktion der Technischen Universität Ilmenau gepflegte Datenbank zu den in Deutschland gebauten automatisierten Regallagern kann keine Angaben zu eingesetzten Strategien liefern.

¹⁰In Anbetracht des Grundlagencharakters der Arbeiten von Heskett und der Häufigkeit mit der diese auch im deutschen Sprachraum zitiert werden, muss es sehr verwundern, dass diese Arbeiten in deutschen Bibliotheken und in der internationalen Fernleihe nicht verfügbar sind. Andererseits nannten KALLINA und LYNN HESKETTS Arbeiten schon 1976 „somewhat inaccessible“ [KL76, S. 37]. Nichtsdestotrotz ergibt sich aus der Vielzahl der Veröffentlichungen, welche sich auf Heskett beziehen, ein recht gutes Bild des Inhalts dieser Arbeit.

4.4.3. Umsetzung des CPO-Kriteriums

Sowohl die Ableitung einer optimalen Zoneneinteilung und -zuordnung in Lagern selbst, als auch die Bewertung der sich daraus ergebenden Optimierungspotentiale ist bis heute nicht abgeschlossen. Konfigurationen, welche aufwendigere Verfahren erfordern, sind:

- höhere Zonenanzahlen
- der Formfaktor weicht von 1 ab
- die Übergabe-/Übernahmepositionen befindet sich nicht in einer Ecke des Regals
- mehrfachtiefe Regale werden behandelt
- das Lastaufnahmemittel des Regalbediengerätes kann mehrere LE aufnehmen
- die Anzahl Regalbediengeräte ist nicht mit der Gassenanzahl identisch

Das verwundert nicht, da bei diesen Konfigurationen und insbesondere ihrer Kombination selbst die Fahr- bzw. Spielzeitberechnung noch Gegenstand der Forschung ist (z. B. in [WCC01, GM02, Lip03, MM97, EGM04, OR04]). Im Folgenden wird die Literatur zu Schnellläuferstrategien geordnet und chronologisch aufbereitet.

4.4.3.1. Grundlagen

Gleichzeitig mit der Etablierung des CPO-Kriteriums wurde versucht, die Erkenntnisse in Lagern effizient umzusetzen und die erzielbaren Durchsatzsteigerungen zu quantifizieren. GRAVES, HAUSMAN und SCHWARZ stellten in einer Serie von drei Beiträgen die analytische Berechnung und die simulative Überprüfung der Einsparpotentiale bei Anwendung des CPO-Kriteriums dar [HSG76, GHS77, SGH78]. Diese Arbeiten bilden bis heute die Basis für eine Vielzahl von Veröffentlichungen. GRAVES, HAUSMAN und SCHWARZ haben darin grundlegende Beschreibungsformen vorgestellt, welche das Optimierungsproblem analytisch behandelbar und verschiedene Lagerkonfigurationen vergleichbar machen. Dies sind im Wesentlichen

- die geschlossene Darstellung verschiedener Sortimente durch Wahl eines einzigen Parameters,
- die Vermeidung diskreter Funktionen durch Einsatz kontinuierlicher Approximationen und
- die Normierung aller Definitions- und Wertebereiche in das Intervall $[0, 1]$.

Statt mit konkreten Ausprägungen von Fahrzeiten, Mengen und Durchsätzen wird mit den Quantilen der entsprechenden Verteilungen gerechnet. Dabei lieferte der erste Beitrag [HSG76] die Grundlagen der kontinuierlichen Approximation und eine analytische Ableitung

4. Schnellläuferstrategien

des Optimierungspotentials. Optimale Klassengrenzen für zwei und drei Zonen wurden bestimmt und die Ergebnisse mit einer ersten statischen Simulation überprüft. Der zweite Beitrag [GHS77] überträgt das Kalkül auf Doppelspiele und stellt Betrachtungen zur optimalen Zonenform bei diesen an. Im dritten Beitrag [SGH78] untersuchen die Autoren per Simulation den Einfluss unterschiedlicher Auftragsabarbeitungsreihenfolgen und die Auswirkungen von Unsicherheit der Verweildauerprognose.

Im deutschen Sprachraum hat GUDEHUS erste Betrachtungen zum Einfluss von Schnellläuferstrategien angestellt [Gud72]. Darin machte er u. a. Vorschläge zur Größe der Schnellläuferzone in einem zweizonigen Lager, ohne jedoch schon erzielbare Fahrzeitverbesserungen zu quantifizieren. PRETTENTHALER stellte in [Pre79] eine Formel zur Bestimmung der Fahrzeiterparnis bei zwei Zonen in Abhängigkeit von Größe und Ansprechfrequenz der Schnellläuferzone vor.

4.4.3.2. Wechselwirkungen mit der benötigten Lagerkapazität

Wird eine Lagerung von Artikeln in anderen als den eigentlich zugewiesenen Zonen ausgeschlossen, wird der Umfang, in dem sich Minimal- und Maximalbestände verschiedener Artikel ausgleichen können, eingeschränkt. HAUSMAN *et al.* haben diesen Umstand bei der Beschreibung ihres Verfahrens ausgeblendet und sprechen von „turnover-based assignment“¹¹. Trotzdem wird diese Art der Zuordnung beispielsweise von VAN DEN BERG [vdB99, S. 754] und ASHAYERI [AHBW02, S. 30] als „dedicated storage“ beschrieben, was bedeuten könnte, das Verfahren diene zur Umsetzung bei fester Lagerplatzzuordnung. Der Ansatz des mittleren Bestandes statt des Maximalbestandes pro Artikel durch HAUSMAN *et al.* steht jedoch in Widerspruch dazu.

Infolge dieses Missverständnisses wird immer wieder versucht, den Gewinn durch im Mittel kürzere Fahrzeiten zu den einzelnen Zonen mit Verlusten durch längere Wege in den „notwendigerweise“ größeren Lagern aufzurechnen und in diesem Spannungsfeld ein Optimum zu finden [RR84, CS91, Mal96, vdB96, EGM04]. Überschreitungswahrscheinlichkeiten werden für die Bestände und Kapazitäten einzelner Zonen berechnet und die notwendigen Einzelzonkapazitäten kumuliert.

Die pragmatische und in der Praxis auch eingesetzte Vorgehensweise ist dagegen, auch Lagerung in Nachbarzonen zuzulassen. Diese Maßnahme verhindert, dass sich die Zonenbildung negativ auf die erforderliche Lagerkapazität auswirkt. Andererseits wird dadurch die Möglichkeit zur exakten mathematischen Beschreibung sehr erschwert. Meist wird deshalb der Weg gewählt, entweder Servicegrad, Sicherheitsbestände und Artikelanzahl ganz auszublenken und nur mit dem Bestand $Q(i)/2$ für jeden Artikel zu rechnen, oder die notwendige Kapazität wird nur einmal für den Gesamtbestand unabhängig von Zonierungen bestimmt.

4.4.3.3. Zonenbildung und Bewertung des Optimierungspotentials

HAUSMAN *et al.* bestimmten optimale Klassengrenzen lediglich für den 2-Klassen-Fall und leiteten das Optimierungsergebnis für zwei und drei Klassen bei Formfaktor 1 her. Seitdem

¹¹umschlagsratenbasierte Zuordnung

wurden die Aussagen zu optimalen Klassengrenzen und erzielbaren Einsparungen immer allgemeingültiger:

ROSENBLATT und EYNAN lösten das Problem der Berechnung optimaler Zonengrenzen für n Zonen durch ein $(n - 1)$ -stufiges Berechnungsverfahren. Sie demonstrierten mit Hilfe des Verfahrens u. a., dass 12 Zonen 99.1 % der Einsparungen der vollständig umschlagsratenbasierten Anordnung erschließen, was sich mit 20 Zonen auf 99.73% steigern lässt [RE89]. Später erweitern sie das Kalkül auch auf Lager, welche nicht Formfaktor $f = 1$ aufweisen [ER94]. KOUVELIS und PAPANICOLAOU stellten die optimale Lösung inklusive Wahl der Klassengrenze für den 2-Klassen-Fall auch für von 1 abweichende Formfaktoren dar [KP95].

ASHAYERI *et al.* fanden geschlossene Darstellungen für die erwarteten Spielzeiten auch unter Einbeziehung der Fahrzeiten im Doppelspiel [AHV⁺01]. Durch den geometrischen Ansatz basiert die Berechnungsvorschrift auf zahlreichen Fallunterscheidungen mit Einzellösungen.

PARK, FOLEY, WHITE und FRAZELLE lieferten letztlich in einem umfassenden Beitrag geschlossene Darstellungen der Mittelwerte und Varianzen aller Fahrzeiten im Einzel- und Doppelspiel bei umschlagsratenorientierter Anordnung für beliebige Formfaktoren [PFWF03]. Ihren umfangreichen Ergebnistabellen kann man u. a. entnehmen, dass in einem 20/90-Sortiment beim Doppelspiel die Fahrzeit zwischen Ein- und Auslagerort 1.65 mal so lange dauert wie die Fahrt von dort zur Übernahme-/gabeposition. Bei gleichverteilten Fachzugriffen dauert diese Fahrt nur 0.7 mal so lange.

ASHAYERI *et al.* schlagen anhand eines konkreten Anwendungsfalls einen weiteren Algorithmus vor [AHBW02]. Dieser erlaubt die Berechnung von Zonen und Spielzeiten bei beliebigen Formfaktoren auch bei unterschiedlicher Lage der Übergabe- und Übernahmepunkte. Die Zuordnung der Lagereinheiten erfolgt zufällig innerhalb einer Zone. Die Zonenanzahl ergibt sich aus dem Algorithmus. Es werden so lange Produkte einer Zone hinzugefügt, bis der Erwartungswert der Spielzeit steigt. Die Zone wird dabei sukzessive vergrößert. Beginnt der Erwartungswert zu steigen, wird eine neue Zone begonnen.

Der Algorithmus von ASHAYERI *et al.* bestimmt optimierte Zonenanzahlen, Zonengrößen und -lagen und ermöglicht erstmals Anwendung auch bei Durchgangslagern. Nachteilig ist die außerordentlich komplexe Berechnung der Spielzeiterwartungswerte bei Formfaktoren $f \neq 1$ und falls sich Übergabe- und Übernahmepunkt nicht am gleichen Ort befinden. Bei Durchgangslagern führt der Algorithmus zu einer leicht asymmetrischen Lastverteilung und lässt so Optimierungspotential ungenutzt. ASHAYERI *et al.* erzielten in ihrem Anwendungsfall eine Fahrzeitverbesserung von 25% in einem Durchgangslager mit 6 Zonen.

4.4.3.4. Mehrfachlastaufnahmemittel und mehrfachtiefe Lagerung

JARVIS und MCDOWELL untersuchten das Optimierungspotential der Anordnung von Artikeln in einem Kommissionierlager [JM91]. Dabei unterschieden sie Wegezeiten innerhalb der Vorzone zum Erreichen der richtigen Gasse(n) und Wegezeiten innerhalb einer Gasse. Musste eine Gasse betreten werden, war sie komplett zu traversieren. Das macht diese auf den ersten Blick anders geartete Konfiguration durch eine gedanklich Umformung direkt mit der Situation innerhalb einer Gasse vergleichbar. Die Vorzone von JARVIS und MCDOWELL wird zur Lagergasse selbst und die Zeit für das Traversieren der Gasse kann als Lastabgabe- bzw. -aufnahmezeit aufgefasst werden. Das Kommissionieren eines Auftrages aus dem Lager

4. Schnellläuferstrategien

und dessen Gassen wird zu einer linearen „Rundfahrt“ innerhalb einer Lagergasse. JARVIS und MCDOWELL ordnen nun die Artikel im Lager nach CPO den Lagergassen mit zunehmender Entfernung zu. Sie untersuchen dann Sortimente mit 200 und 400 Artikeln aus denen Aufträge kommissioniert werden, welche 2.5%, 5%, 7.5% und 10% aller Artikel beinhalten. Gegenüber gleichverteilter Zuordnung erzielen Sie Fahrzeiteinsparungen von 30-50% für ein 20/60-Sortiment und Einsparungen von 40-70% für ein 20/80-Sortiment weitgehend unabhängig von der Artikelanzahl im Sortiment. Dieses Ergebnis macht die Sinnhaftigkeit einer Anordnung nach CPO auch bei mehreren Lastaufnahmen oder -abgaben pro Arbeitsspiel deutlich. In der Praxis wird innerhalb eines Ganges mit geringeren Einsparungen zu rechnen sein, da mit jeder der diskreten Fahrzeiten zu einer Gasse gleich viele Lagerorte erreicht werden. Bei Tschebyscheffschen Fahrzeiten innerhalb einer Gasse sind überproportional mehr Lagerorte mit längeren Fahrzeiten vorzufinden. JARVIS und MCDOWELL behandelten im Gegensatz zu LEE keine erhöhten Wahrscheinlichkeiten, dass verschiedene Artikel gemeinsam innerhalb eines Auftrages geordert werden.

LEE untersuchte ebenfalls die Optimierung der Artikelanordnung, wenn Rundfahrten im Lager ausgeführt werden [Lee92]. Er zeigt die NP-Vollständigkeit dieser Optimierungsaufgabe und entwickelt eine Heuristik für die Artikelanordnung. Er benutzt die Anordnung nach dem CPO-Kriterium als Ausgangspunkt, bemerkt aber, dass diese durchaus weit vom Optimum entfernt sein kann¹². Er zeigt, dass eine Gruppierung häufig gemeinsam geordneter Artikel um 2-11% bessere Ergebnisse bringt als die Anordnung nach CPO.

SARKER, MANN und DOS SANTOS bewerteten ebenfalls eine Schnellläuferstrategie im Zusammenhang mit Zweifachlastaufnahmemitteln [SJDS94]. In einem Lager mit zwei Zonen versucht ihre Strategie, Lageroperationen klassenbasiert zu kombinieren und so räumlich zu konzentrieren. Diese Strategie ist der einfachen „Nächster-Nachbar“-Strategie zur Bildung günstiger Arbeitsspiele überlegen. Es werden Fahrzeiteinsparungen von bis zu 25% erzielt.

OSER und RITONJA entwickelten eine Formel zur Spielzeitberechnung für zonierte Lager mit doppelttiefer Lagerung [OR04]. In dieser Formel gehen Terme auf die Wahrscheinlichkeit ein, in den verschiedenen Zonen in unterschiedlichem Umfang doppelttief einlagern zu müssen und dadurch mehr oder weniger Umlagerungen zu erzwingen. Es werden verschiedene Zoneneinteilungen verglichen, die Zonenzuordnung der Artikel jedoch unverändert belassen. Dadurch sind einzelne Zonen schlicht über- oder unterdimensioniert. Erwartungswerte der einzelnen Fahrzeiten zwischen den Lagerorten werden nicht angegeben. Damit bleibt die Quantifizierung der Auswirkungen der Zonenbildung in doppelttiefen Lagern weiter offen.

4.4.3.5. Andere Zonenbildungen

MOON, YOON und PARK schlagen die Einführung einer „Common Zone“ zwischen den Zonen bei 2/D/A-Strategien¹³ vor [MYP01], um Lagerkapazitätsengpässen vorzubeugen. Die beiden Originalzonen bleiben weiterhin exklusiv zugeordneten Lagereinheiten vorbehalten. Diese werden bei der Einlagerung an einem zufälligen Ort in ihrer eigenen Zone oder der

¹²„Note that the COI rule considers only the demand frequency and the space requirement of an item without taking advantage of structures of orders as well as their occurrence frequencies. Hence, the layout obtained using this approach would be far from optimum.“ [Lee92, S. 2284]

¹³Klassifizierung s. Abschnitt 4.5.1 auf Seite 46

gemeinsamen Zone zugeordnet. Da die Autoren ohne „Common Zone“ Kapazitätsengpässe beobachten, scheinen sie die Zonengrößen auf die mittleren Bestände ausgelegt zu haben. Die Grundzüge der Kapazitätsplanung von Lagern und Zonen werden ignoriert und der Servicegrad über die Größe der gemeinsamen Zone eingestellt. Bei Erhöhung des Lagerdurchsatzes werden die Warteschlangen kürzer, weil mehr Artikel in der fahrzeitgünstigsten Zone gelagert werden. Aus diesem, allen bedientheoretischen Gesetzmäßigkeiten widersprechenden, Resultat muss man schließen, dass die ursprüngliche Zonengrenzenfestlegung willkürlich erfolgte und nicht in einem nachvollziehbaren Zusammenhang zum Sortiment stand. Für die Auswertung werden Absolutereignisse gezählt und ohne Angabe von Grundlast, -leistung und Simulationszeitraum angegeben, was die Bewertung erschwert.

Weitere Veröffentlichungen, welche sich mit der optimalen Zonierung von Lagern befassen, sind [Aza89], [HR90], [LMK97] und [HDMS05]. Diesen ist gemein, dass darin mit „Zonen“ Lagerbereiche, wie Puffer- und Vorzonen, Cross-Docking-Bereiche und gesamte Hochregallager bezeichnet werden. Diese Bereiche unterscheiden sich stark in ihrer technischen Ausstattung oder durch teils fehlende Restriktionen. Im Sinne dieser Arbeit handelt es sich damit jeweils nicht um ein, sondern um mehrere Lager. Damit werden in diesen Veröffentlichungen im engeren Sinne weder Schnellläuferstrategien noch Cache-Strategien behandelt, obwohl Parallelen bestehen. Die für Schnellläuferstrategien relevanten Fahrzeitunterschiede entstehen hier durch die grundsätzlich verschiedenen technischen Umsetzungen und den dafür gewählten Modellierungen, wie z. B. Fahrzeit 0 für Pufferbereiche.

4.4.4. Zusammenfassung

Man kann konstatieren, dass die große Verbreitung besonders der klassenbasierten Schnellläuferstrategien mittlerweile historische Gründe hat. Auf Basis des CPO-Kriteriums versuchte man mit ersten Schnellläuferstrategien durch Bildung nur weniger Klassen Optimierungseffekte zu erzielen. Detaillierte analytische Untersuchungen erlaubten bald die Berechnung der Einsparungen. Als später eine vollständig umschlagsratenorientierte Anordnung untersucht wurde, glaubte man, diese stark differenzierende Aufteilung praktisch nicht nutzen zu können. Erstens ließ die damals noch in den Kinderschuhen steckende Rechentechnik die Implementierung und den wirtschaftlichen Betrieb komplexer Verfahren nicht zu. Zweitens erkannte man, dass Informationen zu Umschlagsraten weder immer bekannt noch konstant sind¹⁴. Drittens sollten nur drei Klassen 85% des Optimierungspotentials erschließen können [HSG76]. Viertens wird mitunter noch immer angenommen, dass die Erhöhung der Zonenanzahl zu höherem Kapazitätsbedarf im Lager und damit auch zu höheren Fahrzeiten führen muss. Auch die verbreitete ABC-Analyse, welche immer einen Schritt der Artikel-Zonen-Zuordnung bildet, suggeriert die Angemessenheit von drei Zonen.

Letztendlich bleibt der Schluss, die möglichen Umschlagsraten nur noch „grob“ einigen wenigen Zonen zuzuordnen¹⁵. Die statistische Zusammenfassung der Umschlagsrateninformation überdeckt dann die Unsicherheit im konkreten Einzelfall und gleichzeitig wird die

¹⁴ „It is unrealistic to assume that the turnover of every pallet will be known and/or constant over time.“ [HSG76, S. 635]

¹⁵ „Hence, it is desirable to develop a storage assignment rule which permits weaker assumptions.“ [HSG76, S. 635]

4. Schnellläuferstrategien

Anzahl der zu bestimmenden Zonengrenzen limitiert. Seitdem wurden höhere Klassenanzahlen nicht mehr als praktikable oder auch nur wünschenswerte Lösung in Betracht gezogen. Dies änderte sich erst mit der Erkenntnis, dass die Umschlagsraten der Artikel nicht die beste Basis für Schnellläuferstrategien bilden (vgl. [GR90] und Abschnitt 5.2 auf Seite 52). Leider sind die Implikationen dieser Erkenntnis nicht spontan einleuchtend und haben deshalb bis heute wenig Beachtung gefunden.

4.5. Systematik

4.5.1. Klassifikationsmerkmale

Es bleibt festzuhalten, dass die Strategien selbst, ihre Anwendung und die Einschätzung der Einflussfaktoren auf ihre Leistungsfähigkeit tatsächlich sehr komplex und nur fachgebietsübergreifend zu erfassen sind. Um der Gefahr der bereits erwähnten Missverständnisse vorzubeugen, wird eine Systematik der Schnellläuferstrategien vorgeschlagen.

Als Klassifikationsmerkmale von Schnellläuferstrategien können folgende Größen identifiziert werden:

1. Zonenanzahl ($1-\infty$)
2. Exklusivität der Zonen (**D**edicated, **S**hared)
3. Betrachtungseinheit der Verweildauerprognose für Lagereinheiten (**A**rticle, **U**nit)
4. Stellplatzfindung innerhalb einer Zone (**U**niform, **T**ravel Time)
5. Art der Festlegung und konkrete Ausprägung der Zonengrenzen
6. Datenbasis für die Bestimmung der Zonengrenzen
7. Art der Reorganisation
8. Verfahren der Verweildauerprognose

Dabei kann es nützlich sein, für die unterschiedlichen Strategien eine verkürzte Notation zu verwenden. Dieses Vorgehen ist von den Vorschlägen von KENDALL [KEN53] für die Klassifizierung von Bediensystemen inspiriert.

Nach dieser Systematik handelt es sich bei der klassischen Einteilung in 3 nicht-exklusive Zonen und Zuordnung auf Artikelbasis mit kürzester Fahrzeit innerhalb einer Zone um eine 3/S/A/T-Schnellläuferstrategie. Die „feste Lagerplatzvergabe“ wird als ∞ /D/A-Strategie klassifiziert. Im folgenden sind die einzelnen Kriterien näher erläutert:

4.5.2. Zonenanzahl $1 - \infty$

Eine Zone im Lager entspricht einer Menge von Lagerplätzen, denen Lagereinheiten einer Menge bestimmter Attributausprägungen zugeordnet werden. Das Spektrum reicht dabei von nur einer Zone, über eine willkürlich festgelegte niedrige Zonenanzahl bis hin zu einer theoretisch abzählbar unendlichen Zonenanzahl.

Eine einzige Zone ist gleichbedeutend mit fehlender Differenzierung nach Attributen der Lagereinheiten. Die Gleichverteilungs- und die Kürzeste-Fahrzeit-Strategie fallen in diese Kategorie. Die Gleichverteilungsstrategie (GV) ist dabei eigentlich keine Schnellläuferstrategie. Sie wird wegen ihrer Bedeutung als Grundlage für viele Berechnungen und als Vergleichsmaßstab trotzdem aufgeführt. Die Kürzeste-Fahrzeit-Strategie (KFZ) ist eine echte Schnellläuferstrategie, da durch bevorzugte Auswahl der fahrtzeitgünstigen Stellplätze eine Durchsatzverbesserung angestrebt wird. Bei geringeren Lagerfüllgraden führt KFZ durch die geringere genutzte Lagerkapazität zu im Mittel kürzeren Wegen und damit zum Erfolg. Bei hohen Füllgraden (>90%) tritt ein gegenteiliger Effekt ein (s. 5.5.3.4). Eine Zonenanzahl von 1 macht alle weiteren Kriterien überflüssig. Gleiches gilt dann für die Anwendung der Notation.

Eine Zonenanzahl von 2, 3 und seltener 4 Zonen resultiert aus einer willkürlichen Festlegung der Zonenanzahl. Verfahren, welche diese Zonenanzahlen aufweisen, versuchen so, den Aufwand der Klassen- und Zonenbildung zu begrenzen. Bei der Zonenbildung werden in den kontinuierlichen Intervallen der Attributausprägungen ein oder mehrere Grenzwerte bestimmt, deren Über- bzw. Unterschreiten die Zonenzuordnung bestimmt. Zahlreiche Arbeiten befassen sich mit der Bestimmung optimaler Grenzen und mit dem Nachweis, dass eine derart geringe Zonenanzahl bereits den Großteil des Optimierungspotentials erschließt (s. Abschnitt 4.4).

Eine größere Zonenanzahl resultiert, wenn jeder unterscheidbaren Attributausprägung eine eigene Zone zugeordnet wird. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn jeder Artikel in einem separaten Bereich gelagert wird. Die Zonenanzahl entspricht dann der Artikelanzahl. Auch die Strategien ADAPTIVE (s. Abschnitt 5.2.2 auf Seite 54) und DYN (s. Abschnitt 5 auf Seite 51) führen zu einer großen Zonenanzahl. Da die konkrete Anzahl der Zonen von Fall zu Fall unterschiedlich sein wird und auch im Zeitablauf nicht immer konstant bleibt, sollten solche Strategien mit ∞ notiert werden, obwohl ihre Zonenanzahl zu jedem Zeitpunkt endlich und abzählbar ist.

4.5.3. Exklusivität der Zonen – *Dedicated* oder *Shared*

Wird die Lagerung in Zonen, welche nicht den zugeordneten Attributen der Lagereinheiten entsprechen, ausgeschlossen, wird von fester Lagerplatzzuordnung oder exklusiver Zonenzuordnung gesprochen. In diesem Fall muss auch das Kalkül zur Kapazitätsbestimmung auf jede Zone separat angewendet werden. Dabei steigt die insgesamt benötigte Lagerkapazität mit der Anzahl der Zonen und entspricht immer der Summe der Maximalbestände der einzelnen Zonen (s. Abschnitt 3.1.1 auf Seite 22).

Im Sprachgebrauch bezeichnet „feste Lagerplatzzuweisung“ oft auch, dass jedem einzelnen Artikel ein eigener Lagerbereich zugeordnet ist. Dies stellt einen Extremfall der exklusiven Lagerortzuweisung dar. Das Lagereinheitsattribut, auf dem die Zonenbildung aufbaut, ist in diesem Fall die Artikelkennung. Jede Kennung erhält eine eigene Zone. Die Zonenanzahl

4. Schnellläuferstrategien

entspricht der Artikelanzahl und die benötigte Lagerkapazität der Summe aller Artikelmaximalbestände.

Der Vorteil exklusiver Zonenzuordnung besteht darin, dass die Lagerverwaltung auch ohne rechentechnische Unterstützung möglich ist¹⁶ und sich Lerneffekte bei der manuellen Bedienung des Lager einstellen. Dem gegenüber steht der deutlich erhöhte Kapazitätsbedarf und der hohe Aufwand für die Änderung einer einmal getroffenen Zonenzuordnung.

Ist die Lagerung von Lagereinheiten auch in Zonen gestattet, denen andere Attributausprägungen zugeordnet sind, als die Lagereinheit aufweist, spricht man von freier Lagerplatzzuweisung i. S. v. nicht-exklusiven Zonen. Maximal- und Minimalbestände verschiedener Artikel können sich ausgleichen, was zu vermindertem Kapazitätsbedarf führt. Freie Lagerplatzverwaltung ist nur mit Rechnerunterstützung effizient umsetzbar.

Existiert nur eine einzige Zone, herrscht implizit freie Lagerplatzvergabe.

4.5.4. Bezugsgröße der Verweildauer – *Article* oder *Stockkeeping Unit*

Bei Schnellläuferstrategien erfolgt die Einordnung von Lagereinheiten auf Basis ihrer Verweildauer. Diese muss vor der Einlagerung prognostiziert werden.

Offensichtlich ist die Verweildauer einer Lagereinheit vom enthaltenen Artikel abhängig. Die Verweildauer wird durch die Art und Weise der Disposition determiniert, welche den Artikelverbrauch prognostizieren muss und die zu lagernden Mengen festlegt. Diese Prognosedaten sind direkt für die Bestimmung der Verweildauer einer Lagereinheit verwendbar, wobei zwischen Lagereinheiten des gleichen Artikels nicht differenziert wird. Die Verweildauerprognose ist *artikelbezogen*. Dieser Ansatz wird von allen in der Literatur beschriebenen Schnellläuferstrategien gewählt.

Die einzige Ausnahme besteht bisher in der 1990 von GOETSCHALCKX und RATLIFF veröffentlichten Arbeit, welche die Schnellläuferstrategien auf eine verbesserte Grundlage stellen [GR90]. Darin wird vorgeschlagen, die Verweildauer nicht artikelbezogen sondern *lagereinheitsbezogen* zu bestimmen. In Abschnitt 5.2 auf Seite 52 wird der Ansatz dargestellt, begründet warum er gerechtfertigt ist und welche Konsequenzen daraus gezogen werden müssen.

4.5.5. Stellplatz innerhalb einer Zone – *Uniform* oder *Shortest-Travel-Time*

Die Auswirkungen dieses Kriteriums sind bisher unterschätzt worden. Das mag daran liegen, dass analytische Untersuchungen zu 100% belegte, perfekt balancierte Lager verwenden und auch Simulationsuntersuchungen kurzfristige Bestandsschwankungen ausblenden. In Abschnitt 5.5.3.4 auf Seite 88 wird erläutert, warum zwischen gleichverteilter Zuweisung und der Kürzeste-Fahrzeit-Strategie Unterschiede bestehen. Das geschilderte Verhalten ist in kleinerem Maßstab auch innerhalb der Zonen wiederzufinden. Die Abbildungen 5.16 und 5.17 (Seite 83) stellen die Leistungsunterschiede in zonierten Lagern dar.

¹⁶Selbstverständlich kann auch freie Lagerplatzvergabe manuell über (Papier-)Listen realisiert werden. Aufwand und Fehlerträchtigkeit dieses Verfahrens machen daraus aber eine eher theoretische Alternative.

4.5.6. Weitere Kriterien

Schnellläuferstrategien lassen sich noch nach weiteren Kriterien unterscheiden, welche aber nicht für jede Konfiguration sinnvoll sind. Insbesondere trifft das auf Kriterien zu, welche nur angegeben werden können, falls tatsächlich Zonen gebildet werden.

Festlegung der Zonengrenzen Wird das Lager in Zonen unterteilt, müssen deren Grenzen festgelegt werden. Diese Festlegung muss in 2 Dimensionen getroffen werden. Erstens müssen die konkreten Attributausprägungen bestimmt werden, die zu einer Zuordnung in einer der Zonen führen. Zweitens müssen auch die Lagerkapazitäten der einzelnen Zonen im Lager dimensioniert werden. Diese Einteilung simultan tatsächlich optimal vorzunehmen, stellt für sich eine komplexe Optimierungsaufgabe dar. Praktisch ist deshalb auch die willkürliche Festlegung der Grenzen in einer Dimension und die Ableitung der Parameter in der anderen Dimension aus diesen Werten üblich.

Datenbasis der Zoneneinteilung Um die Festlegung der Zonengrenzen vornehmen zu können, müssen die entsprechenden Daten zum Sortiment vorliegen. Dabei wird meist auf das Warenwirtschaftssystem mit allen Daten zu Beschaffungs-, Produktions- und Absatzplanung zurückgegriffen. Alternativ dazu besteht auch die Möglichkeit, Zonengrenzen auf Basis im Lagerverwaltungssystem erfasster Vergangenheitsdaten vorzunehmen. Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass die Schnittstelle zur Datenübergabe zwischen Warenwirtschaftssystem und Lagerverwaltung entfällt. Allerdings folgt die realisierte Zoneneinteilung nur mit Zeitverzögerung der angemessenen Einteilung [Fis98].

Zonenanpassungsverfahren Sind dynamische Sortimente zu behandeln, muss auf die Verschiebung der Umschlagsraten reagiert werden. Dies kann neben der Änderung der Artikelzuordnung durch Anpassung der Zonengrenzen im Lager und damit der Zonenkapazität oder über Anpassung der Klassengrenzen (Grenzumschlagsraten) erfolgen. Letzteres ist der Veränderung der Zonen im Lager vorzuziehen [Bra97].

Zusätzlich zu diesen Kriterien muss für die eindeutige Bestimmung einer Schnellläuferstrategie im praktischen Einsatz noch die Art der Verweildauerbestimmung festgelegt werden. Für die theoretische Betrachtung der Leistungsgrenzen der einzelnen Strategien wird von *a priori* bekannten Verweildauern ausgegangen.

5. Dynamische Zonierung

5.1. Motivation

Aus der Literaturbesprechung in Abschnitt 4.4 lassen sich einige Problemschwerpunkte identifizieren, welche den Einsatz von Schnellläuferstrategien erschweren und Optimierungspotential ungenutzt lassen. Herkömmliche Schnellläuferstrategien haben folgende Unzulänglichkeiten:

- Verschiedene Lagergeometrien, Kinematiken der Regalbediengeräte und Lagen der Übergabe- und Übernahmepunkte, sowie nicht zuletzt verschiedene Sortimente erfordern angepasste Klassen. Die korrekte Berechnung der Klassengrenzen und von Lage, Form und Größe der Zonen ist sehr aufwendig und hat sich aufgrund ihrer Komplexität zu einem eigenen Wissenschaftszweig entwickelt [Gud72, HSG76, GHS77, Pre79, LW84, LW87, GR90, HR90, JM91, ER94, KP95, SB95, vdB96, Bra97, KOSB99, LBA01, MYP01, AHBW02, SGH78]. Mehrere Arbeiten versuchen Überblick über Literatur zu Schnellläuferstrategien zu geben [Cor97, vdB99].
- Veränderungen im Sortiment lassen einmal vorgenommene Zuordnungen veralten. Diese Effekte können durch saisonbedingte Einflüsse, Produktlebenszyklen, Marketingmaßnahmen oder ganz allgemein zufällige Ereignisse hervorgerufen werden. Die Umschlagsraten von Artikeln im Sortiment verändern sich und somit müssen auch Klassen und Zonen angepasst werden. Wiederholte Anpassungen führen nicht etwa zu einer optimalen Anordnung, sondern dazu, dass Artikel über weite Lagerbereiche verteilt gelagert werden. Die Fehlbelegungsrate ist beträchtlich und soll bis in Höhe von 30% toleriert werden [Bra97].
- In den meisten Analysen von Schnellläuferstrategien wurden Effekte auf den zeitlichen Verlauf von Ein- und Auslagerungen, welche sich aus der Disposition der Artikel im Warenwirtschaftssystem ergeben, ausgeblendet. Falls Dispositionsverfahren zur Anwendung kamen, wurden sie nur genutzt, um mittlere gelagerte Mengen und Umschlagsraten aus Durchsätzen zu bestimmen und nicht, um den zeitlichen Verlauf von Zu- und Abgängen im Lager abzubilden. Die Effekte aus den Bestandsverläufen wirken sich auf zonierte Lager ausgesprochen ungünstig aus. Erstens entstehen dadurch Schwierigkeiten, Einsparpotentiale zu beziffern und zweitens bleiben Optimierungspotentiale in größerem Umfang als bisher angenommen ungenutzt.

Eine verbesserte Schnellläuferstrategie muss deshalb an folgenden Punkten ansetzen:

- Vereinfachung bzw. Vermeidung der Klassen- und Zonenbildung,
- Vereinfachung bzw. Vermeidung der Klassen- und Zonenanpassungen,
- besseres Erschließen des Optimierungspotentials und
- bessere Vorhersagbarkeit der praktisch erzielbaren Fahrzeiteinsparungen.

Um in diese Ziele zu erreichen, kann auf deutlich verbesserte rechentechnische Möglichkeiten, als bei der Entwicklung der herkömmlichen Strategien zur Verfügung standen, zurückgegriffen werden.

5.2. Lagereinheitsbezogene vs. artikelbezogene Verweildauern

5.2.1. Unterschiedliche Verweildauern der Lagereinheiten eines Artikels

Die Notwendigkeit zu Lagern entsteht durch Diskrepanzen zwischen der Abgangsrate eines Prozesses und der Verbrauchsrate des Folgeprozesses. Diese entsprechen der Einlagerungsrate bzw. der Auslagerungsrate aus Sicht des Lagers an der Schnittstelle zwischen diesen Prozessen. Aus dieser Diskrepanz der Raten folgt nicht nur die Notwendigkeit der Lagerung, sondern unmittelbar auch, dass Einheiten ein und des selben Artikels unterschiedliche Verweildauern im Lager haben müssen. Bei gleichen Verweildauern müsste die Abgangsrate zeitversetzt den gleichen zeitlichen Verlauf wie die Zugangsrate aufweisen. In dieser Situation würde eine Synchronisation der Prozesse der Nutzung eines Lagers vorgezogen werden. Sind mehrere Artikeleinheiten zu einer Lagereinheit zusammengefasst, übertragen sich die unterschiedlichen Verweildauern der Artikeleinheiten auch auf die Verweildauern der Lagereinheiten dieses Artikels.

Aus den Verfahren, wie Lagerbestände verwaltet werden (s. Abschnitt 2.2), lassen sich direkt Informationen zu Ein- und Auslagerungszeitpunkten herleiten. Macht ein Lagerprinzip (z. B. FIFO) Ein- und Auslagerungen zuordenbar, können auch die Verweildauern *einzelner Lagereinheiten* bestimmt werden. Wie in Abschnitt 4.3 erläutert, bilden diese die Basis für eine durchsatzoptimale Zuordnung von Lagereinheiten zu Lagerorten.

Diese Betrachtungsweise wurde von GOETSCHALCKX und RATLIFF [GR90] vorgeschlagen und unterscheidet sich deutlich von der artikelbezogenen Betrachtungsweise. Diese ordnet allen Lagereinheiten, die einen Artikel i enthalten, die gleiche Verweildauer zu. Bleibt man vollkommen konform zu den Modellannahmen, welche in der Literatur getroffen werden (EOQ), *können* diese Lagereinheiten jedoch keinerlei gleiche Verweildauern aufweisen. Unabhängig von der Auslagerreihenfolge der $Q(i)$ Lagereinheiten einer Bestellmenge des Artikels i wird jede einzelne Lagereinheit eine andere Verweildauer aufweisen. Die Verweildauern der zuerst ausgelagerten Lagereinheiten werden dabei wesentlich kürzer ausfallen als die

Verweildauern der zuletzt ausgelagerten Einheiten. Die maximale Verweildauer einer Lagereinheit dieses Artikels entspricht genau der Beschaffungsperiode $\frac{Q(i)}{D(i)}$. In Abbildung 5.1 ist

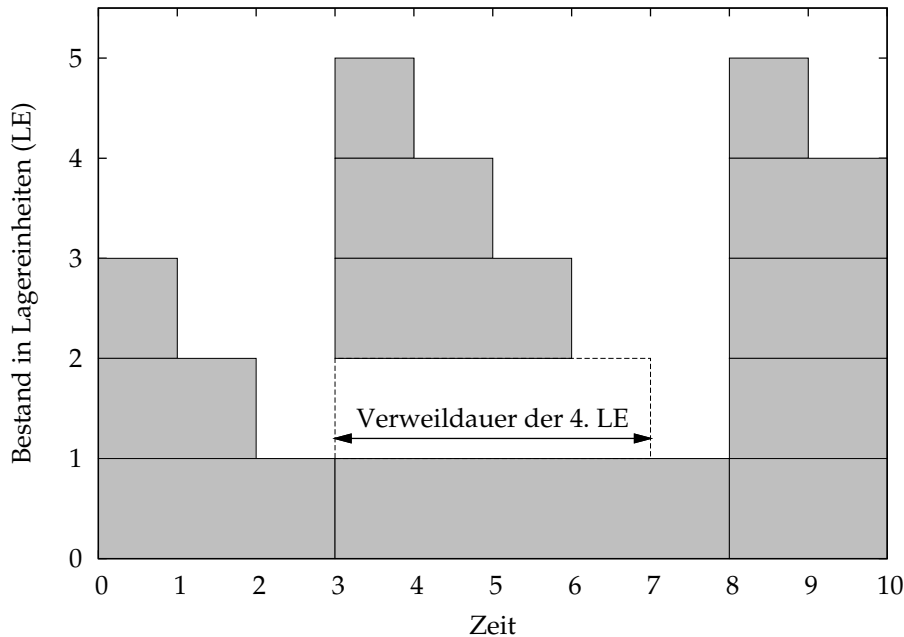


Abbildung 5.1.: Bestandsverlauf eines Artikels → unterschiedliche Verweildauern einzelner Lagereinheiten (LE)

exemplarisch der Bestandsverlauf eines Artikels mit $D(i) = 1 \frac{\text{LE}}{\text{ZE}}$ und $Q(i) = 5 \text{ LE}$ dargestellt.

Die artikelbezogene Betrachtungsweise muss deshalb dazu führen, dass die Anordnung der Lagereinheiten nicht optimal ist. Ein einfaches Beispiel, welches nur 2 Artikel des Sortimentes betrachtet, soll dies illustrieren. Die Bestellmengen der Artikel $Q(A)$ und $Q(B)$ seien gleich und die Bestellungen treffen gleichzeitig ein. Nach Artikel B herrscht eine etwas geringere Nachfrage ($D(A) > D(B)$). Nach klassischer Anordnung werden alle Einheiten von $Q(B)$ zugriffsgünstiger gelagert als die Einheiten von $Q(A)$. Ein Großteil der Einheiten von $Q(B)$ wird aber kürzere Verweildauern aufweisen, als die zuletzt verbrauchte Einheit von $Q(A)$. Ein Tausch der Lagerorte dieser Einheit mit der zuerst verbrauchten Einheit von $Q(B)$ wird zu einer Verbesserung der mittleren Fahrzeit führen. Selbstverständlich tritt eine Fahrzeitverbesserung praktisch erst dann ein, wenn Lagereinheiten anderer Artikel die relativ schnell frei werdenden Lagerorte der zuerst ausgelagerten LE „zwischenutzen“.

Solange nicht Sicherheitsbestände den überwiegenden Anteil der gelagerten Menge ausmachen, ist zu erwarten, dass die Verweildauerdifferenzen zwischen Lagereinheiten des selben Artikels oft deutlich größer ausfallen, als die Differenz der mittleren Verweildauern verschiedener Artikel.

Der sägezahnartige Verlauf des Bestandes eines disponierten Artikels ist kein Sonder- sondern der Regelfall (s. Abschnitt 2.3). Er resultiert aus der Bildung von Losen, um kostenintensive Operationen (Bestellung, Lieferung, Umrüstung), statt für jede einzelne Einheit, für

Gruppen von Einheiten (Lose) ausführen zu können. Im weiteren Sinne sind diese Operationen und damit die Losbildung Folge des o. g. Ausgleichs unterschiedlicher Zu- und Abgangsra-ten. Ist die Abgangsrate höher als die Zugangsrate, werden die Sägezähne eher linksschief, umgekehrt eher rechtsschief sein. Unabhängig davon, ob es sich bei den beteiligten Prozessen um Produktions-, Transport oder Beschaffungsprozesse werden für den Quotienten $\frac{Q(i)}{D(i)}$ die Bezeichnungen *Bestellzyklus* sowie *Beschaffungsperiode* angewendet.

5.2.2. Die Strategie ADAPTIVE von Goetschalckx und Ratliff

GOETSCHALCKX und RATLIFF haben die lagereinheitsbezogene Verweildauerbetrachtung 1990 vorgeschlagen [GR90]. Sie führten dabei folgende Begriffe ein:

Ein System heißt *balanciert*, wenn in jeder Periode T die Anzahl der Zugänge der Anzahl der Abgänge entspricht. Zum Ende jeder Periode ist die Platzkapazität des Systems voll ausgelastet. Für jede eintreffende Einheit gibt es einen freien Platz. Ein balanciertes Lager hat minimale Platzkapazität in der Höhe des mittleren Bestandes der Einheiten aller Artikel.

Ein System heißt *perfekt balanciert*, wenn für jede Periode T gilt, dass die Anzahl der abgehenden Einheiten mit der Verweildauer t_{VW} der Anzahl der eintreffenden Einheiten mit dieser Verweildauer für alle t_{VW} entspricht. Die Anzahl der in Periode T eintreffenden Einheiten mit Verweildauer t_{VW} wird mit $n_{t_{VW}}(t)$ bezeichnet. Ein System ist dann perfekt balanciert, wenn für alle T und t_{VW} gilt $n_{t_{VW}}(T) = n_{t_{VW}}(T + t_{VW})$.

Aufbauend auf diese Definitionen stellen GOETSCHALCKX und RATLIFF das folgende Theorem auf und beweisen dessen Gültigkeit:

Eine Stellplatzzuweisungsstrategie, welche sowohl Fahrzeit als auch benötigte Lagerkapazität in einem perfekt balancierten System minimiert, ordnet für jede Periode $t_{VW} = 1, 2, \dots$ die $z_{t_{VW}}$ freien Lagerorte mit den geringsten Fahrzeiten Lagereinheiten zu, deren Verweildauer gleich t_{VW} ist.

In Abbildung 5.2 ist die Umsetzung einer solchen optimalen Strategie nach dargestellt. Es handelt sich um ein perfekt balanciertes Lager mit 3 Artikeln. Die Artikel A und B werden und mit der gleichen Rate $D(A) = D(B) = 1 \frac{\text{LE}}{\text{ZE}}$ verbraucht. Sinkt der Bestand auf 0 LE erfolgt die Beschaffung der Menge $Q(A) = Q(B) = 3 \text{ LE}$. Die Lagerung erfolgt linienförmig, wobei die Fahrzeit dem Platzindex entsprechen soll. Das Lager gliedert sich in drei Bereiche:

1. 1 Lagerplatz für Lagerung von Einheiten mit Verweildauer 1 ZE: Anzahl der Lageroperationen in diesem Bereich 2/ZE; Fachzugriffshäufigkeit 2
2. 2 Lagerplätze für Lagerung von Einheiten mit Verweildauer 2 ZE: Anzahl der Lageroperationen in diesem Bereich 2/ZE; Fachzugriffshäufigkeit 1
3. 3 Lagerplätze für Lagerung von Einheiten mit Verweildauer 3 ZE: Anzahl der Lageroperationen in diesem Bereich 2/ZE; Fachzugriffshäufigkeit $\frac{2}{3}$.

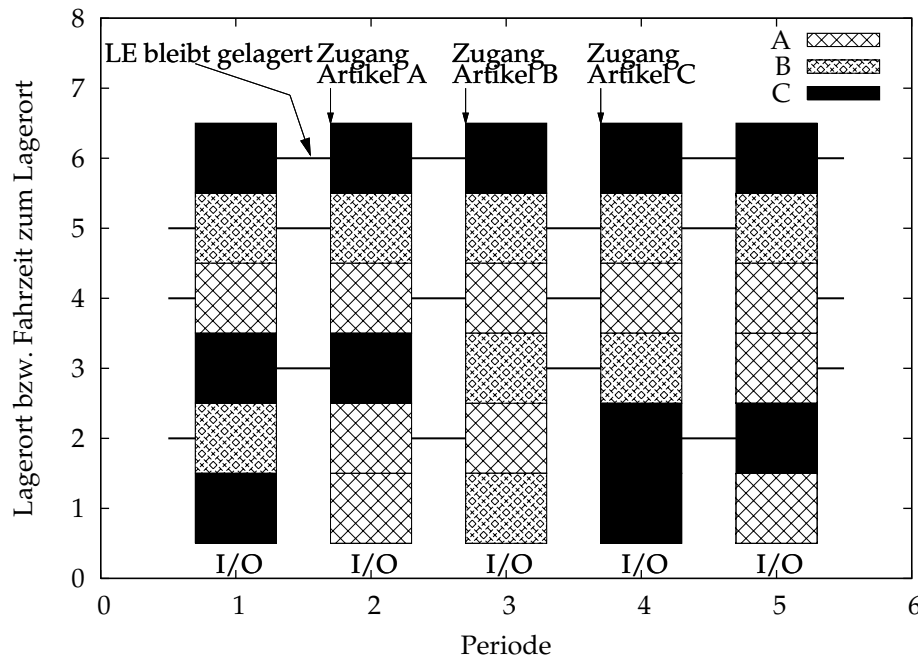


Abbildung 5.2.: Perfekt balanciertes Lager mit 3 Artikeln

Die mittlere Fahrzeit in diesem Lager beträgt 2.83 ZE. Falls artikelbezogene Verweildauern eingesetzt werden, besteht keinerlei Optimierungspotential und die mittlere Fahrzeit beträgt 3.5 ZE. Durch die Verwendung lagereinheitsbezogener Verweildauern als Anordnungsgrundlage wurde eine Fahrzeiterparnis von 19% erzielt. GOETSCHALCKX und RATLIFF betonten selbst, dass es sich bei einem solchen perfekt balancierten Lager um eine sehr idealisierte Situation handelt. Nichtsdestotrotz gehen auch alle herkömmlichen, artikelbasierten Untersuchungen implizit von einer solchen Situation aus.

Aufbauend auf der Erkenntnis, dass lagereinheitsbasierte Verweildauern die richtige Grundlage für Schnellläuferstrategien bilden, schlugen GOETSCHALCKX und RATLIFF den Algorithmus ADAPTIVE (adaptiv) vor [GR90, S. 1126], welcher auf der nächsten Seite dargestellt ist. Der Algorithmus berechnet aus den Wiederbeschaffungsmengen aller Artikel und der mittleren Zeit zwischen zwei Bestellungen eines Artikels a_i Zonengrenzen und Zonenzuordnungen. Die Besonderheit dieses Algorithmus besteht darin, dass er, abgesehen vom kumulativen Übertrag, ausschließlich mit diskreten Größen rechnet. Für jede der diskreten Verweildauern wird eine eigene Zone gebildet. Dies führt praktisch zu einer großen Anzahl Zonen mit geringen Kapazitäten.

Resonanz auf den Artikel GOETSCHALCKX und RATLIFF ist in der Literatur schwer zu finden. In vielen Arbeiten, welche sich ausdrücklich mit durchsatzsteigernden Strategien in automatisierten Lagern befassen, wird die lagereinheitsbezogene Betrachtungsweise nicht erwähnt (z. B. [Bra97]). Selbst wenn die Arbeit GOETSCHALCKXS und RATLIFFS zitiert wird, sind ihre Implikationen weitgehend unbeachtet geblieben.

EYNAN und ROSENBLATT zitieren nur nebensächliche Aussagen [ER94]. VAN DEN BERG bezeichnet die lagereinheitsbezogene Betrachtungsweise als *Alternative* zur Anordnung nach

Algorithmus 1 Der Algorithmus ADAPTIVE

1. Für jede Verweildauer t_{VW} setze
 - $n_{t_{VW}} = 0$
 - Für jeden Artikel i
 - * Für jede LE $k = 1 \dots Q(i)$ der Wiederbeschaffungsmenge des Artikels i berechne
 - $t_{VW} = k \cdot a_i$
 - $n_{t_{VW}} = n_{t_{VW}} + 1 / (Q(i) * a_i)$
 2. Für jede Verweildauer t_{VW} berechne
 - $z_{t_{VW}} = n_{t_{VW}} \cdot t_{VW}$
 - Setze den kumulativen Übertrag, die Vorgängergrenze und die Zone = 0
 3. Für jede Verweildauer t_{VW} berechne
 - kumulativer Übertrag = kumulativer Übertrag + $z_{t_{VW}}$
 - Wenn der kumulative Übertrag > 1 ist, dann setze
 - Zone = Zone + 1
 - Zonengröße(Zone) = Abrunden (kumulativer Übertrag)
 - untere Verweildauergrenze = Vorgängergrenze + 1
 - obere Verweildauergrenze = t_{VW}
 - kumulativer Übertrag = kumulativer Übertrag - Zonengröße(Zone)
 - Vorgängergrenze = t_{VW}
-

dem Cube-per-Order-Index [vdB99, S. 754]¹. Tatsächlich ist die lagereinheitsbezogene Betrachtungsweise jedoch die *korrekte Umsetzung* des CPO.

Von KULTUREL *et al.* wird der adaptive Algorithmus als eine von mehreren Strategien umgesetzt und bewertet. Dabei wird keine Leistungsverbesserung festgestellt und der Algorithmus aus diesem Grund und wegen seiner Komplexität abgelehnt [KOSB99]. Dieses Ergebnis konnte nicht reproduziert werden, da die Beschreibung der Konfiguration der Experimente durch KULTUREL *et al.* unzureichend ist. Dieser Umstand, sowie einige weitere Darstellungen, lassen Zweifel an der Korrektheit der Ergebnisse zu². Durch LIPPOLD [Lip03, S. 38] wird die Möglichkeit der lagereinheitsbezogenen Betrachtungsweise genannt, aber nicht kommentiert oder bewertet.

Als Ursache für die geringe Beachtung, welche die lagereinheitsbezogene Betrachtungsweise bisher gefunden hat, kommen verschiedene Möglichkeiten in Betracht:

- GOETSCHALCKX und RATLIFF selbst machen nur vage Aussagen zur Sinnhaftigkeit der lagereinheitsbezogenen Betrachtungsweise.
- Der Algorithmus ADAPTIVE ist ausgesprochen schwer zu implementieren.
- Informationen, auf denen der Algorithmus aufbaut, sind schlecht verfügbar bzw. lassen sich nur mit außerordentlichem Aufwand in die Lagerverwaltung kommunizieren.
- Eine simulative Untersuchung der Leistungsfähigkeit des Algorithmus erfordert die Modellierung des Warenwirtschaftssystems und die Implementierung einer Lagerverwaltung. Die analytischen Grundlagen einer *a-priori*-Bestimmung der Leistung werden erst durch diese Arbeit in Abschnitt 5.4 erarbeitet.

Mit der Dynamischen Zonierung können die Nachteile des Algorithmus ADAPTIVE vermieden werden.

5.3. Die Strategie DYN

Für optimalen Lagerdurchsatz muss die Verweildauerverteilung der Lagereinheiten im Lager auf die Fahrzeitverteilung abgebildet werden. Dies geschieht über die Gleichsetzung der Quantile in der Fahrzeit- und in der Verweildauerverteilung. Dazu kann man sich die Verteilungen von Verweildauern der Lagereinheiten und Fahrzeiten der Lagerorte als geordnete Listen von Werten veranschaulichen. Praktischerweise ist dies genau die Form, in der diese Werte in der Praxis vorzufinden sind, und zwar in der Lagerverwaltungssoftware. Da die neue Schnellläuferstrategie „Dynamische Zonierung“ keine Zonen bildet, ist diese Bezeichnung in sich widersprüchlich, aber dennoch der eingängigste Weg die Zielrichtung zu verdeutlichen. In Abbildung 5.3 ist der Ablauf der dynamischen Zonierung schematisch dargestellt. In Schritt

¹„[...] introduce the *duration of stay* for individual loads as an alternative to the COI.“

²Beispielsweise wird in einem Diagramm die Fahrzeiterparnis als Funktion der Kapazitätsverminderung des Lagers als Simulationsergebnis (!) dargestellt. Das ist m. a. W. die Fahrzeit in Abhängigkeit vom Fahrweg.

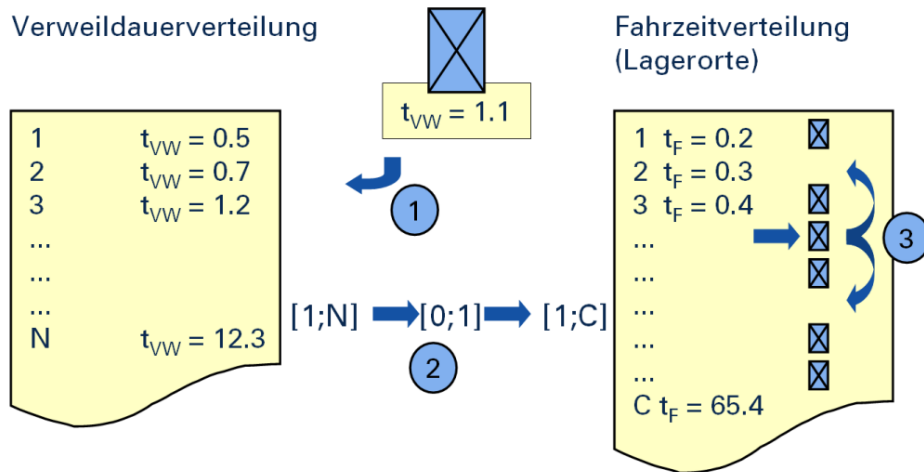


Abbildung 5.3.: Schematische Darstellung des Ablaufs der Dynamischen Zonierung.

1 wird der Index der prognostizierten Verweildauer der LE in der sortierten Liste aller (prognostizierten) Verweildauern im Lager bestimmt. Schritt 2 bestimmt über eine Normierung den Zielindex in der nach Fahrzeiten sortierten Liste der Lagerorte. Zuletzt wird in Schritt 3 der tatsächliche Lagerort festgelegt.

Auf die konkrete Umsetzung der einzelnen Schritte wird in den folgenden Abschnitten eingegangen. Der Algorithmus wird darin als DYN notiert.

5.3.1. Bestimmung des Verweildauerquantils

Während die Verteilung der Fahrzeiten vollständig bekannt und konstant ist, erfordert die Bestimmung der Verweildauerverteilung und der Quantile der Verweildauern einzelner Lagereinheiten einigen Aufwand.

Ein Zahlenwert ξ_α heißt α -Quantil der Zufallsvariablen X , wenn eine der beiden gleichwertigen Eigenschaften erfüllt ist [Bos98]:

1. $P(X \leq \xi_\alpha) \geq \alpha$ und $P(X \geq \xi_\alpha) \geq 1 - \alpha$

Mindestens $100 \cdot \alpha\%$ der Wahrscheinlichkeitsmasse sind auf Werte konzentriert, welche kleiner oder gleich als ξ_α sind. Mindestens $100 \cdot (1 - \alpha)\%$ der Wahrscheinlichkeitsmasse sind auf Werte konzentriert, welche größer oder gleich als ξ_α sind.

2. $P(X < \xi_\alpha) \leq \alpha$ und $P(X > \xi_\alpha) \leq 1 - \alpha$

Höchstens $100 \cdot \alpha\%$ der Wahrscheinlichkeitsmasse liegen links von ξ_α .

Höchstens $100 \cdot (1 - \alpha)\%$ der Wahrscheinlichkeitsmasse liegen rechts von ξ_α .

Um das Quantil einer konkreten Verweildauer bestimmen zu können, benötigt man die Verweildauerverteilung (s. Abschnitt 4.3.2). Wie bereits im Abschnitt 2.3 dargestellt, lässt sich diese Verteilung theoretisch aus Informationen über das Sortiment *a priori* herleiten. Diese

Vorgehensweise verursacht in der Praxis zwei Schwierigkeiten: Erstens verändert sich das Sortiment. Eine Eingrenzung des Sortimentes auf den im betrachteten Lager untergebrachten Anteil sowie die exakte Festlegung des relevanten Betrachtungszeitpunktes sind nicht ohne weiteres möglich. Zweitens sind die zur Berechnung der Verweildauern von Lagereinheiten benötigten Daten über das Warenwirtschaftssystem (WWS) und das Lagerverwaltungssystem (LVS) verteilt. Diese Systeme stammen nicht selten von verschiedenen Softwarelieferanten. Die *a-priori*-Bestimmung der Verweildauerverteilung erforderte also Informationsaustausch zwischen WWS und LVS und damit umfangreiche Schnittstellen. Kapitel 6 geht detaillierter auf diese Schwierigkeiten ein.

Als Alternative bietet sich an, die Verweildauerverteilung direkt im Lagerverwaltungssystem zu bestimmen. Dadurch können zahlreiche Abstimmungs- und Abgrenzungsprobleme vermieden werden. Dieser Umstand ist für die Einsatzfähigkeit des Verfahrens von großer Bedeutung.

Als Basis für die Verweildauerverteilung werden Verweildauern von Lagereinheiten im LVS empirisch gewonnen. Prinzipiell gibt es für die Bestimmung der Verweildauerverteilung, d. h. die Art der Stichprobennahme, drei Möglichkeiten. Entweder man beobachtet (a1) die tatsächlichen Verweildauern der Abgänge, (a2) die prognostizierten Verweildauern der Zugänge oder (b) die prognostizierten Verweildauern der Lagereinheiten im Lager. Bei den verschiedenen Varianten ist folgendes zu beachten:

- a** Aus der Beobachtung der Verweildauern der Lagereinheiten im Strom der Ein- bzw. Auslagerungen lässt sich die Verteilung der Verweildauern im Lager nicht direkt bestimmen. Ursache ist das „*paradox of residual life*“ [Kle75, S. 169f.], welches dazu führt, dass kurze Verweildauern zu häufig und lange Verweildauern zu selten beobachtet werden³. Deshalb muss die empirisch bestimmte Verteilungsfunktion transformiert werden.

Bei der Implementierung muss zunächst eine geeignete Listengröße für die Verwaltung der beobachteten Verweildauern gewählt werden. Um alle auftretenden Verweildauern beobachten zu können, muss die Untergrenze für diese Anzahl aus dem Gesamtdurchsatz multipliziert mit der größten auftretenden Verweildauer berechnet werden. Schätzungen auf Basis von Stichproben geringen Umfangs sind verzerrt, weil Lagereinheiten mit hohen Verweildauern während des Beobachtungszeitraums u. U. gar nicht *bewegt* werden. Da sowohl der Durchsatz als auch die Verweildauern stochastischen Einflüssen unterliegen, ist die Listengröße mit Sicherheitszuschlägen festzulegen.

Praktisch können in Lagern auch sehr große Verweildauern (>6 Monate) beobachtet werden. Diese resultieren u. a. auch aus mangelhafter Disposition („vergessene“ Lagereinheiten). Beobachtete Verweildauern über solche Zeiträume zu speichern, führt zu erheblichem Datenverwaltungsaufwand.

³Genaugenommen handelt es sich um die Umkehrung dieses Paradoxons. Das „Paradox-of-Residual-Life“ besagt, dass in einem Prozess lange Zeitdauern zu zufälligen Zeitpunkten überproportional häufig beobachtet werden. Dies repräsentiert aber genau die aus Sicht der Verweildauerverteilung interessante Häufigkeit im Lager. Beobachtet man wie im vorliegenden Fall aber die Häufigkeit der Zustandsänderungen, erhält man die Häufigkeiten, mit der einzelne Verweildauern absolut im Strom der Lagereinheiten vorkommen, nicht aber die Häufigkeit mit der diese im Lager anzutreffen sind.

5. Dynamische Zonierung

t_{VW}^*	α	α angepasst
$(N = 0)$ beliebig	nicht definiert	$\frac{1}{2}$
$t_{VW}^* \leq t_0$	0	$\frac{1}{2(N+1)}$
$t_{VW}^* > t_{N-1}$	1	$\frac{2N+1}{2(N+1)}$
$t_{VW}^* = t_j$	$\frac{j}{N}$	$\frac{j}{N+1}$
sonst	$\frac{j^*}{N}$	$\frac{j^*}{N+1} \frac{t_{j^*-1} - t^* + j^* (t_{j^*} - t_{j^*-1})}{t_{j^*} - t_{j^*-1}}$

Tabelle 5.1.: Angepasste Quantile

- a1** Die Verwendung der *beobachteten* Verweildauern der Abgänge hat den Vorteil, dass Prognosefehler keinen Einfluss auf die Verweildauerverteilung haben. Die tatsächlichen Verweildauern bilden *ex post* die Verweildauerverteilung. Diese ist aber bereits zum Zeitpunkt der Betrachtung veraltet. Bei im Zeitablauf veränderlicher Verweildauerverteilung führt diese Basis zu Fehlsteuerungen.
- a2** Die *prognostizierten* Verweildauern der Zugänge repräsentieren die aktuelle Verweildauerverteilung besser als die in Variante a1 aufgrund von Abgängen ermittelte. Nachteilig ist, dass Prognosefehler die Schätzung der Verweildauerverteilung beeinflussen.
- b** Der große Vorteil der Variante b liegt darin, dass die Verweildauern der im Lager befindlichen Lagereinheiten direkt eine Stichprobe der gesuchten Verteilung darstellen. Der Stichprobenumfang ist dabei auf die Anzahl der vorhandenen Lagereinheiten begrenzt. Da die tatsächlichen Verweildauern noch nicht bekannt sind, muss auf die *prognostizierten* Verweildauern zurückgegriffen werden, wodurch ein Prognosefehler auftritt. Da seit dem Zeitpunkt der Prognose bei der Einlagerung neue Informationen gewonnen werden können, lassen sich die Prognosewerte u. U. aktualisieren und der Prognosefehler verringern.

Unabhängig davon, wie die Stichprobe der Verweildauern bestimmt wird, lässt sich die Verweildauerliste zur Schätzung des Quantils α der prognostizierten Verweildauer t_{VW}^* der einzulagernden Lagereinheit verwenden. In dieser Liste sind N Lagereinheiten nach aufsteigenden Verweildauern $t_0, \dots, t_{j-1}, t_j, \dots, t_{N-1}$ sortiert. Danach wird die Einfügeposition j^* bestimmt, an der t_{VW}^* in dieser Liste entsprechend der Sortierung einzuordnen wäre. Für die Suche nach der Einfügeposition eines Elementes in eine sortierte Liste gibt es äußerst effiziente Algorithmen, welche für N Elemente nur $\log(N)$ Vergleiche erfordern ($O = \log(N)$). Das gesuchte Quantil ist dann

$$\alpha = \frac{j^*}{N} \quad (5.1)$$

Bei sehr kleinen N führt die Verwendung von α für die Lagerortbestimmung teils zu extremen Resultaten, wie z. B. der Bevorzugung des günstigsten und des ungünstigsten Lagerortes. Über die rein mathematische Definition des Quantilsbegriffs hinaus sind deshalb einige Anpassungen notwendig, welche auch bei sehr geringem Listenumfang für die Lagerortbestimmung nutzbare Quantile liefern (s. Tab. 5.1): Die N vorhandenen Verweildauern teilen den

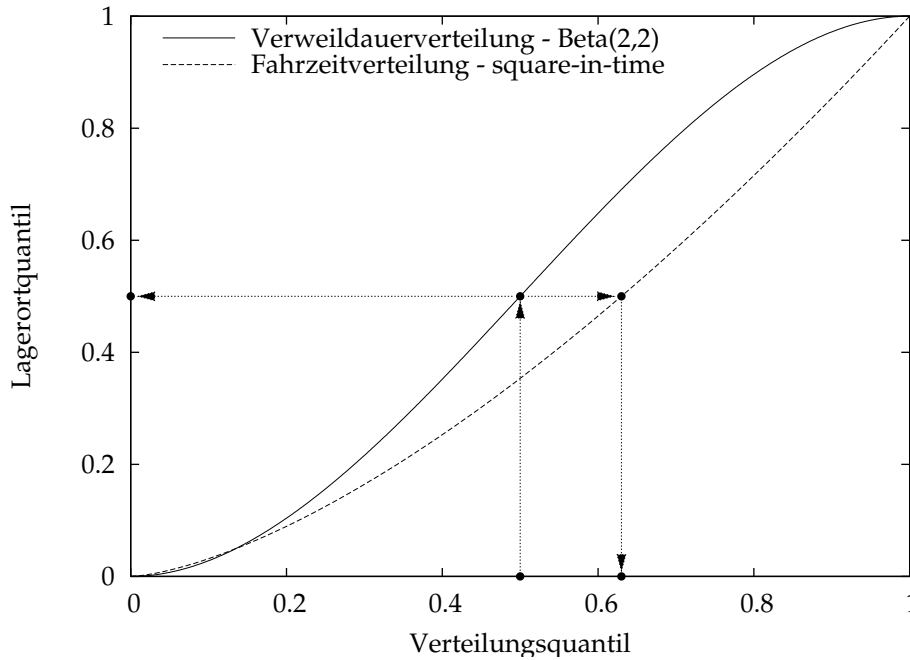


Abbildung 5.4.: Abbildung der Verweildauerverteilung auf Lagerort- und Fahrzeitverteilung

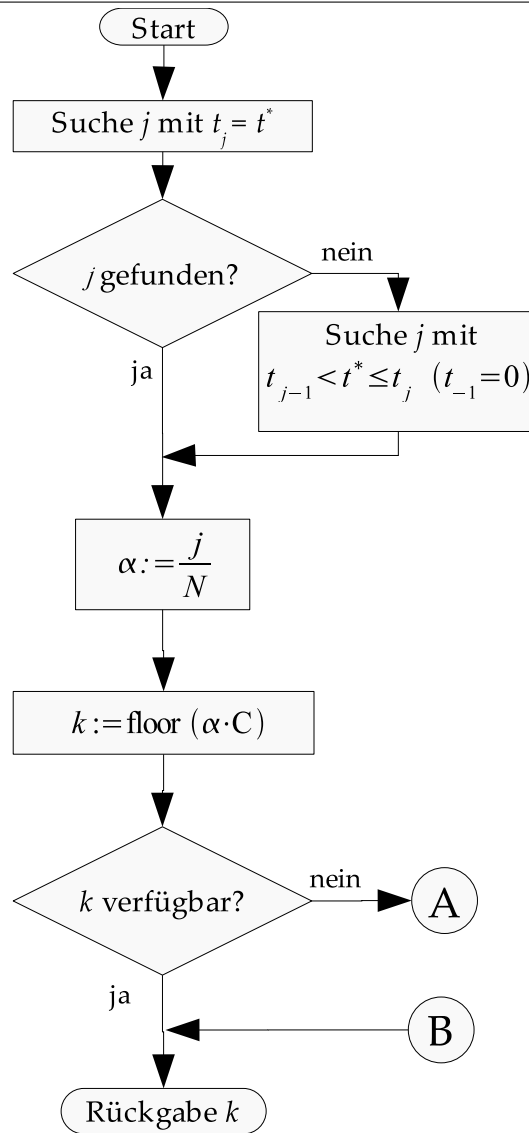
Wertebereich der Verweildauerverteilung in $N + 1$ Abschnitte. Ist der einzuordnende Wert größer als t_N oder kleiner als t_1 wird der 1. bzw. der $N+1$. Abschnitt halbiert. In allen anderen Fällen wird für t_{VW}^* anhand der Verweildauern t_{j-1} und t_j linear interpoliert. Bei größeren N geht die angepasste Variante in die Ursprungsvariante über, weshalb bei praktisch relevanten Listenumfängen keine Auswirkungen der Anpassungen zu erwarten sind. Dies bestätigt auch die Simulation verschiedener Sortimente mit diesem angepassten Algorithmus. Lediglich die Vereinbarung bei leerer Liste einen definierten Wert zurückzugeben, ist für die Funktionsfähigkeit des Algorithmus nötig.

5.3.2. Bestimmung des Lagerortes

Im Gegensatz zur Verweildauerverteilung liegt die Fahrzeitverteilung als diskrete Verteilungsfunktion vollständig vor. Das Quantil der Verweildauerverteilung lässt sich per Multiplikation mit der Lagerkapazität und Rundung direkt in einen Lagerplatzindex k umformen. Hierbei ist die Abrundung zu wählen, da nur dann auf in jedem Fall auf existierende Lagerorte verwiesen wird. Falls der durch den gefundenen Index verwiesene Platz verfügbar ist, erfolgt die Einlagerung auf diesen Platz. Algorithmus 2 stellt den Ablauf der Stellplatzbestimmung dar und Abbildung 5.4 veranschaulicht den mathematischen Hintergrund. Das Quantil der Verweildauerverteilung muss für eine korrekte Abbildung dem Lagerortquantil entsprechen. Über die Inverse der Fahrzeitverteilungsfunktion lässt sich auch die Fahrzeit zu dieser Stelle berechnen.

Die Verfügbarkeit des optimalen Stellplatzes ist jedoch nicht sichergestellt. Tatsächlich ist bei praktisch relevanten Lagerfüllgraden die Wahrscheinlichkeit hoch, dass dieser Lagerplatz bereits belegt bzw. gesperrt ist. Dann muss jeweils ein Ausweichlagerplatz gefunden wer-

Algorithmus 2 Bestimmung des optimalen Stellplatzes



den, welcher die Güte der Lagerlösung möglichst wenig beeinträchtigt. Betrachtet man dazu ausschließlich den optimalen Stellplatz und den Alternativstellplatz, lautet die Partialfahrzeit (vgl. [GR90])

$$t_{F_{p0}} = \frac{t_{F_{opt}}}{t_{VW_{opt}}} + \frac{t_{F_{alt}}}{t_{VW_{alt}}} . \quad (5.2)$$

Die Partialfahrzeit ist der Anteil an der Gesamtfahrzeit zur Bedienung des Lagers, welcher für die Bedienung dieser beiden Plätze nötig ist. Er greift aus dem Gesamtfahrzeitmittel $\bar{t}_F = \sum_{k=1}^N t_{F_k} p_k$ zwei Terme mit $k_1 = opt$ und $k_2 = alt$ heraus.

Wenn die Lagereinheit auf dem Alternativstellplatz k_{alt} gelagert wird, muss eine Lagereinheit, für die dieser Stellplatz optimal wäre, ebenfalls anderswo gelagert werden. Im balancierten Lager kann man annehmen, dass dafür der ursprüngliche Lagerplatz der ersten Lagereinheit k_{opt} verwendet wird. Die Partialfahrzeit lautet nun

$$t_{F_{p1}} = \frac{t_{F_{alt}}}{t_{VW_{opt}}} + \frac{t_{F_{opt}}}{t_{VW_{alt}}} . \quad (5.3)$$

Das entspricht einer Verschlechterung um

$$\Delta t_{F_p} = t_{F_{p1}} - t_{F_{p0}} = \frac{(t_{F_{alt}} - t_{F_{opt}})(t_{VW_{alt}} - t_{VW_{opt}})}{t_{VW_{alt}} t_{VW_{opt}}} . \quad (5.4)$$

Der günstigste Ausweichstellplatz ist derjenige, für den Δt_{F_p} minimal wird.

Bei der praktischen Anwendung kommen als Ausweichstellplätze in jeder Richtung nur die jeweils am nächsten gelegenen verfügbaren Positionen in Frage. Dies sind die Positionen mit dem geringsten Betrag positiver bzw. negativer Indextdifferenz in der Fahrzeitverteilung. Jede weiter entfernte freie Position muss größere Δt_{F_p} aufweisen. Ist nur in einer Richtung eine freie Position vorhanden, wird diese als Ausweichstellplatz direkt ausgewählt. Sind zwei Möglichkeiten vorhanden, können die Δt_{F_p} berechnet und verglichen werden. Der Platz mit dem geringeren Wert ist vorzuziehen.

Die Anwendung von Gleichung (5.4) erfordert Vorbereitungen. Zwar sind die Fahrzeiten für die Berechnung in jedem Fall konstant und bekannt, und $t_{VW_{opt}}$ entspricht immer der prognostizierten Verweildauer der einzulagernden Lagereinheit, die zu verwendenden Verweildauern $t_{VW_{alt}}$ sind jedoch nicht direkt verfügbar. Sie können auf verschiedene Art und Weise bestimmt werden:

- A** aus der Verweildauerverteilung: Zuerst werden die verfügbaren Alternativstellplätze und ihre Quantile in der Fahrzeitverteilung α^+ und α^- bestimmt. Mittels des Lagerbestandes wird die Verweildauerverteilung rekonstruiert. Das α^+ -Quantil und das α^- -Quantil der Verweildauerverteilung entsprechen den Verweildauern, welche an den Alternativstellplätzen gelagerte Lagereinheiten aufweisen sollten. Dies sind eben die $t_{VW_{alt}}$.
- B** aus der Lagerbelegung: Um die Bestimmung der Verweildauerverteilung zu vermeiden, könnten die gesuchten Verweildauern direkt aus der prognostizierten Verweildauer einzelner Lagereinheiten bestimmt werden. Für die Ausweichlagerplätze lässt sich die dort

5. Dynamische Zonierung

Ungleichverteilung s	Lagerfüllgrad	A	B	C	D
1	91%	0.458	0.458	0.457	0.462
0.318	93%	0.395	0.396	0.396	0.411
0.065	55%	0.234	0.235	0.234	0.235
0.065	93%	0.324	0.345	0.383	0.598

Tabelle 5.2.: Normierte Einzelspielzeiten bei verschiedenen Verfahren zur Bestimmung der Alternativstellplätze

angemessene Verweildauer $t_{VW_{alt}}$ nicht direkt anhand einer Lagereinheit ablesen, da diese Lagerplätze per Definition leer sind. Die Nachbarplätze in Richtung des optimalen Stellplatzes sind jedoch mit Sicherheit belegt⁴, weshalb näherungsweise die Verweildauern der dort gelagerten Lagereinheiten eingesetzt wird.

Alle auf Basis von konkreten Lagerorten bestimmten Verweildauern sind jedoch großen Unsicherheiten unterworfen, da die betreffenden Lagereinheiten selbst nach einem Ausweichen auf dieser Position gelagert worden sein könnten. Die Reihung der Verweildauern der Lagereinheiten nach den Fahrzeiten ihrer Lagerorte bildet nur im statistischen Mittel und nicht im konkreten Fall eine Verteilungsfunktion.

C per Indextdifferenz: Eine noch einfachere Heuristik verzichtet gänzlich auf die Bestimmung von $t_{VW_{alt}}$ und die Anwendung von Gleichung (5.4). Es wird der Stellplatz mit dem geringsten Betrag der Indextdifferenz ausgewählt.

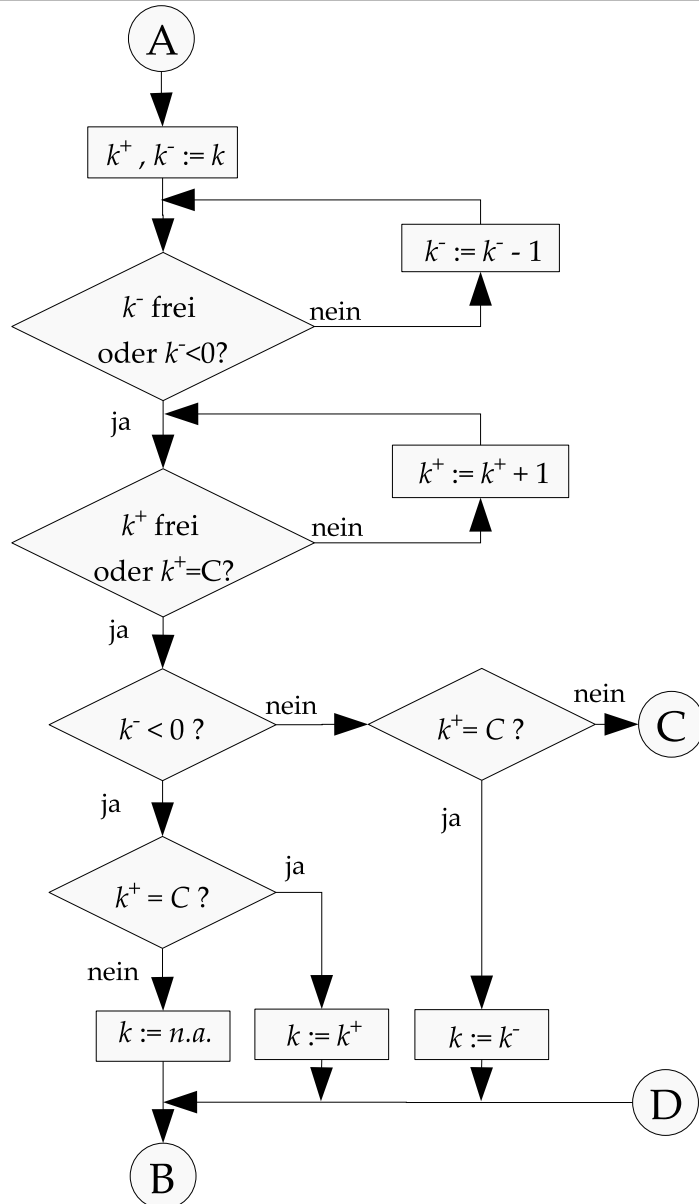
D per Indextdifferenz: Der erste frei Stellplatz in fahrzeitgünstiger Richtung wird gewählt.

Die verschiedenen Varianten wurden für einen Sortiment mit 1000 Artikeln simulativ untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.2 zusammengestellt⁵. Variante D führt durchweg zu den schlechtesten Ergebnissen. Ansonsten sind bei nur geringer Ungleichverteilung im Sortiment oder bei geringen Füllgraden kaum Unterschiede zwischen den Varianten auszumachen. Bei starker Ungleichverteilung im Sortiment und hohen Lagerfüllgraden erweist sich Variante A den anderen Verfahren überlegen und ist deshalb vorzuziehen. In den Algorithmen 3 und 4 ist der Ablauf der Bestimmung von Ausweichlagerplätzen dargestellt.

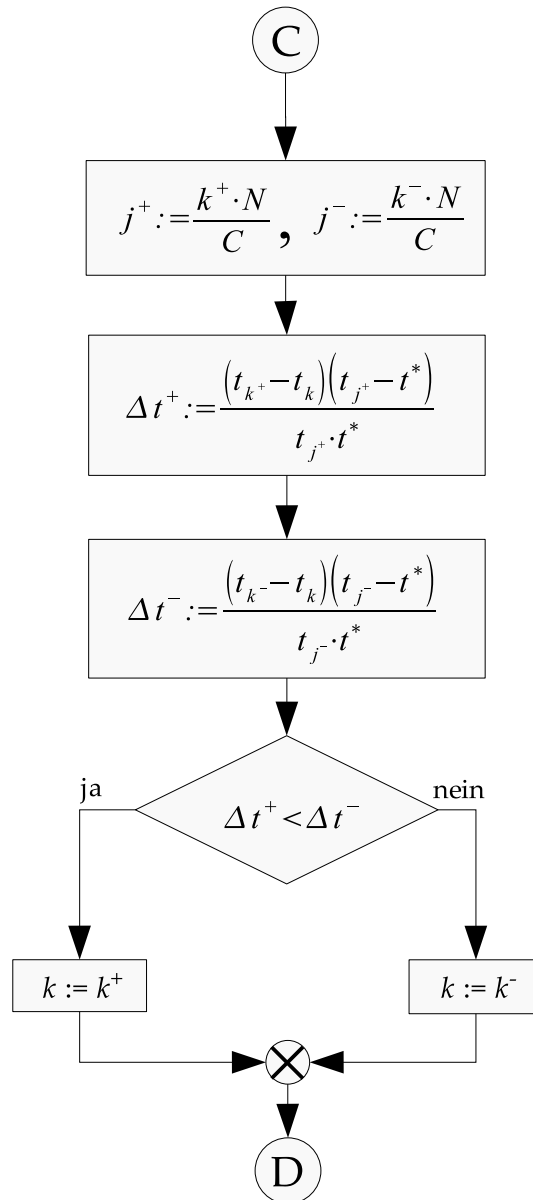
In der Abbildungen 5.5 sind Lagersituationen, welche sich bei Anwendung einer klassischen 3-Zonen-Strategie und der Dynamischen Zonierung ergeben, gegenübergestellt. Dargestellt ist die Seitenansicht des Lagers, welches seinen Übergabe-/Übernahme-Punkt in der linken unteren Ecke des Regals hat. Das Sortiment hat 100 Artikel.

⁴Andernfalls wären schon diese Plätze ins Kalkül gekommen. Im Extremfall ist die verwendete Verweildauer identisch mit der Verweildauer der auf dem optimalen Platz gelagerten Lagereinheit.

⁵Erläuterungen zum Ungleichverteilungsparameter s befinden sich in Abb. 5.6 auf Seite 71. Vollständige Simulationsparameter und Modellannahmen können in Abschnitt 5.5.2 auf Seite 82 nachgelesen werden. Lager und Spielzeiten sind normiert. Die mittlere Einzelspielzeit bei gleichverteilten Zugriffen beträgt $\frac{2}{3}$.

Algorithmus 3 Bestimmung der Alternativlagerorte

Algorithmus 4 Auswahl eines Alternativlagerortes



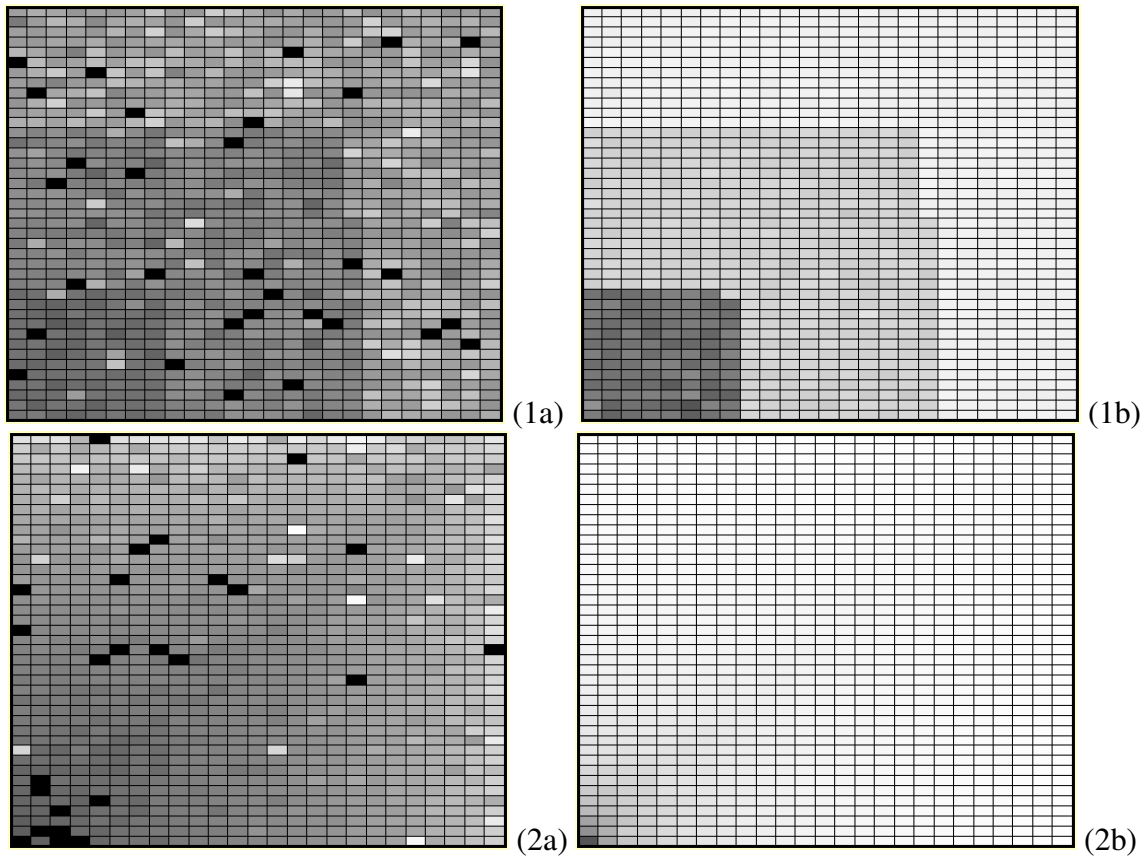


Abbildung 5.5.: **1** Situation im Lager bei Anwendung einer klassenbasierten Strategie mit 3-Zonen
2 Situation im Lager bei Anwendung der dynamischen Zonierung
a Momentaufnahme der Verweildauern des Lagerbestandes (dunkel: t_{VW} niedrig; hell: t_{VW} hoch; schwarz: nicht belegt)
b Fachzugriffshäufigkeit p_k während des Simulationsexperiments (dunkel: hoch; hell: niedrig)

5.4. Analytische Leistungsbestimmung

5.4.1. Modellannahmen

Für die folgenden Untersuchungen wurden Annahmen verwendet, welche als typisch für die Modelle zur Untersuchung von Schnellläuferstrategien gelten können. Diese Annahmen sind mehr oder weniger vollständig in den meisten Veröffentlichungen zu Schnellläuferstrategien zu finden, z. B. in [HSG76, GHS77, SGH78, LW87, AHBW02, PFWF03]. Die Annahmen kommen auch für die folgenden Betrachtungen zur Anwendung und sind ergänzend kommentiert:

1. Jede Lagereinheit enthält nur einen Artikel.
Diese Annahme ist notwendig, da durch die Lagerung verschiedener Artikel innerhalb einer Lagereinheit ein Rückschluss vom Artikel auf die Verweildauer extrem erschwert wird. Ohnehin ist die Zuordnung mehrerer Artikel zu einer Lagereinheit als Notlösung anzusehen [Gud05, S. 624].
2. Das Lager hat nur ein Regalbediengerät, welches auf je ein einfachtiefes Regal zu beiden Seiten zugreift. Der Übergabe- bzw. Übernahmepunkt befindet sich an der linken unteren Ecke des Regals.
An dieser Voraussetzung muss nicht festgehalten werden, solange die Fahrzeiten zu den einzelnen Lagerorten determiniert sind.
3. Das Regalbediengerät kann sich simultan horizontal und vertikal bewegen.
Diese Annahme zielt ebenfalls darauf ab, definierte Fahrzeiten zu erhalten.
4. Die maximale Fahrzeit in horizontaler und vertikaler Richtung ist gleich.
Damit ergibt sich Formfaktor 1 (engl. *square-in-time*), was erhebliche Vereinfachungen bei der Bestimmung der Fahrzeitverteilung mit sich bringt und die Anwendung von Gleichung (4.9) ermöglicht.
5. Das Regalbediengerät hat ein einzelnes Lastaufnahmemittel und führt ausschließlich Einzel- oder Doppelspiele aus.
Mittels dieser Voraussetzung werden kombinatorische und stochastische Probleme ausgeklammert, welche aus der Abfolge von Lastaufnahmen und -abgaben erwachsen.
6. Lastübergabe- und -übernahmezeiten werden vernachlässigt.
Wie bereits erläutert werden nur die Fahrzeitanteile der Spielzeit berücksichtigt. Konstante Zeitanteile der Arbeitsspiele sind durch Schnellläuferstrategien nicht beeinflussbar.
7. Innerhalb der Zonen wird die Kürzeste-Fahrzeit-Strategie eingesetzt.
Diese Annahme ist weit weniger häufig anzutreffen als die vorhergegangenen. Generell nehmen analytische Arbeiten Gleichverteilung innerhalb der Zonen an (beispielsweise [ER94, KP95]). Die analytische Berechnung einer Fahrzeit und Zugriffshäufigkeit für eine Zone erfordert diese Betrachtungsweise. In empirischen Untersuchungen kommt

innerhalb der Zonen auch die kürzeste-Fahrzeit-Strategie zum Einsatz (z. B. [Bra97]), da diese meist leistungsfähiger als die gleichverteilte Zuordnung ist. Bei nicht-exklusiver Zuordnung wird bei Erschöpfung der Zonenkapazität eine Lagereinheit auf der fahrzeitgünstigsten Position der nächsten Zone gelagert. Ist auch die letzte Zone belegt, erfolgt die Zuordnung auf den fahrzeitungünstigsten Plätzen der vorhergehenden Zone. Die Abbildungen 5.16 und 5.17 auf Seite 84 zeigen die Leistungsabweichungen.

Oft nutzen die herkömmlichen Modelle zusätzlich noch folgende Annahmen:

8. Kurzfristige dynamische Erwägungen, wie mögliche Zusammenhänge zwischen aufeinanderfolgen Ein- und Auslagervorgängen oder saisonale Sortimentsverschiebungen werden vernachlässigt.
9. Ein- und Auslagervorgänge werden unabhängig voneinander ausgelöst und nach FIFO abgearbeitet.
10. Das Grundmodell der optimalen Bestellmenge wird benutzt, um die Umschlagsraten aus den Durchsätzen zu berechnen.

Obwohl die Annahmen 8 und 9 von den meisten Modellen, ob analytisch oder simulativ, verwendet werden, klammern diese einen fundamentalen Prozess aus der Betrachtung aus. Mehr noch, wird das Grundmodell der optimalen Bestellmenge für die Bestimmung von Lagermengen und Umschlagsraten benutzt, können die Annahmen zueinander in Widerspruch stehen. Dies ist insbesondere der Fall, wenn als Lagerkapazität die Summe der mittleren Artikelbestände verwendet wird.

Der ausgeschlossene Prozess und die Ursache für diesen Widerspruch ist die losweise Ankunft der einzulagernden Artikeleinheiten⁶. Zum Zeitpunkt der Ankunft eines Loses beansprucht dieses doppelt so viel Lagerkapazität, wie ihm im Mittel zusteht. Auf diese Weise überschreitet jeder Artikel zeitweise die ihm zugemessene Lagerkapazität. Bei den durchsatzstärksten Artikel führt das regelmäßig dazu, dass die Lagerkapazität der fahrzeitgünstigen Zonen erschöpft ist. Infolgedessen werden zahlreiche Lagereinheiten auch anderer Artikel in einer anderen Zone gelagert als geplant. Dieser Effekt kann nur teilweise durch Artikelbestände, welche momentan unterhalb ihres Mittelwerts liegen, ausgeglichen werden. Dies wird gerade durch die schiefe Verteilung der Durchsätze verhindert.

Um in simulativen Untersuchungen auf die Annahmen 8 und 9 verzichten zu können, ist die Implementierung einer Lagerverwaltung notwendig. Deshalb ist darin auch die Ursache dafür zu vermuten, dass auch simulative Untersuchungen diese Annahmen verwenden. Sie erzeugen konstanten Gesamtlagereinheitenstrom, dessen Lagereinheiten Artikelkennungen entsprechend einer Wahrscheinlichkeitsverteilung zugewiesen werden, um die Erschöpfung der Kapazität von Zonen zu vermeiden.

⁶In Produktionsbetrieben führt losweiser Abgang produzierter Einheiten zu den gleichen Effekten.

5.4.2. Artikelbezogene Betrachtung

Im folgenden soll ein Weg aufgezeigt werden, welcher es ermöglicht, die durch die Dynamische Zonierung erzielbaren Einsparungen analytisch zu bewerten. Dazu wird eine Vorgehensweise analog zu der von HAUSMAN *et al.* [HSG76] vorgeschlagenen gewählt. Die lagereinheitsbezogene Betrachtungsweise wird darin integriert.

Die Schritte von HAUSMAN *et al.* werden auch in aktuellen Arbeiten nachvollzogen und bilden quasi das Grundmodell der analytischen Bewertung von Schnellläuferstrategien. Zuerst soll deshalb die Verfahrensweise von HAUSMAN *et al.* näher dargestellt werden, bevor auf die neuen Aspekte eingegangen wird.

Im Grundmodell werden alle Artikel nach ihrem Gesamtnachfrageanteil geordnet („... ranks all items by their contribution to total demand“ [HSG76]). Unter den getroffenen Annahmen stimmt dies mit der Anordnung nach dem Bedarf bzw. der Zugriffshäufigkeit dieses Artikels überein. Werden die Artikel nach dem Grundmodell der optimalen Bestellmenge disponiert, entspricht dies gleichzeitig der optimalen Anordnung nach CPO. Diese Voraussetzung wurde später bei der Beschreibung von Schnellläuferstrategien oft missachtet, wie z. B. in [Gro85, S. 10] oder [JS99, S. 76]. Die Verwendung des Bedarfes oder der Artikelzugriffshäufigkeit ohne Bezug zu den gelagerten Mengen ist grundsätzlich falsch. HAUSMAN *et al.* haben auf die Bedeutung des Dispositionsverfahrens für die Angemessenheit des Ordnungskriteriums „Bedarf“ bzw. Artikelzugriffshäufigkeit nicht explizit hingewiesen. Das Dispositionsverfahren wird nur in einem Nebensatz erwähnt oder aus den Herleitungen erkennbar. Deshalb sind auch schon HAUSMAN, GRAVES und SCHWARZ selbst der Verwendung eines ungeeigneten Ordnungskriteriums bezichtigt worden (z. B. durch [Bra97, S. 89]).

Für die Beschreibung der Durchsätze der Artikel wählen HAUSMAN *et al.* eine Lorenzkurve der Form

$$G(i) = i^s \text{ mit } 0 < s \leq 1. \quad (5.5)$$

Durch die geeignete Wahl des Ungleichverteilungs-Parameters s lässt sich der Grad der Ungleichverteilung der Bedarfe einstellen⁷.

Für die artikelbezogenen Bedarfe $D(i)$ gilt deshalb

$$G(i) = i^s = \int_0^i D(j) dj / \int_0^1 D(j) dj. \quad (5.6)$$

Wählt man der Einfachheit halber

$$\int_0^1 D(j) dj = 1 \quad (5.7)$$

ergibt sich

$$D(i) = si^{s-1}, \quad 0 < i \leq 1. \quad (5.8)$$

Nach dem Grundmodell der optimalen Bestellmenge ist dann als Bestellmenge für den Artikel

⁷NADDOR zeigte später simulativ, dass die sich einstellenden Lagerkosten maßgeblich von Mittelwert und Varianz (Ungleichverteilung) der Bedarfe abhängen, nicht aber von der tatsächlichen Form der Verteilung [Nad78].

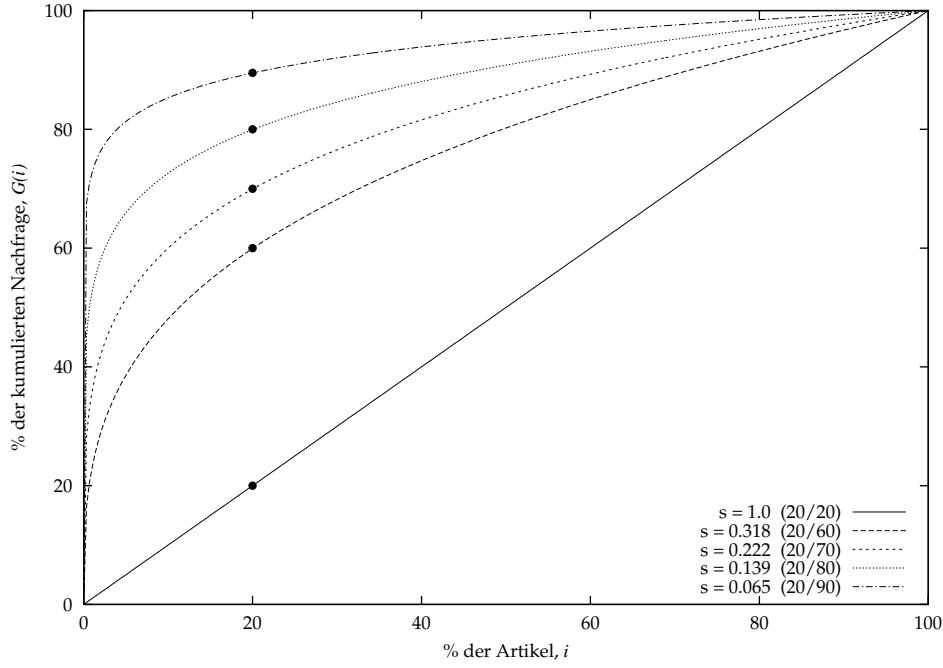


Abbildung 5.6.: Lorenzkurven (nach [HSG76])

 i

$$Q(i) = \sqrt{2KD(i)} \quad (5.9)$$

zu verwenden, wobei K der Quotient aus Lagerhaltungs- und Bestellkosten ist. Die durchschnittlich gelagerte Menge von Artikel i ist $Q(i)/2$ jeweils mit einer Umschlagsrate von

$$2D(i)/Q(i) = \sqrt{2D(i)/K} \quad (5.10)$$

Die für die mittlere gelagerte Menge aller Artikel insgesamt benötigte Lagerkapazität lautet dann

$$L = \int_{i=0}^1 \left(\sqrt{2KD(i)}/2 \right) di = \sqrt{2Ks}/(s+1). \quad (5.11)$$

Bei dieser Form der Lagerkapazitätsbestimmung geht man implizit von freier Lagerplatzvergabe aus. Um den Index $i(k)$ des Artikels der Lagereinheit mit Lagerplatzindex k zu bestimmen muss

$$k = \int_0^{i(k)} \left(\sqrt{2KD(j)}/2 \right) dj \quad (5.12)$$

gelöst werden. D. h. die Lagereinheiten von Artikel i liegen im Lager an Position k .

$$i(k) = k^{2/(s+1)}. \quad (5.13)$$

Die Nachfrage D'_k für eine LE auf Position k lautet

$$D'_k = D_{i(k)} = sk^{2(s-1)/(s+1)}. \quad (5.14)$$

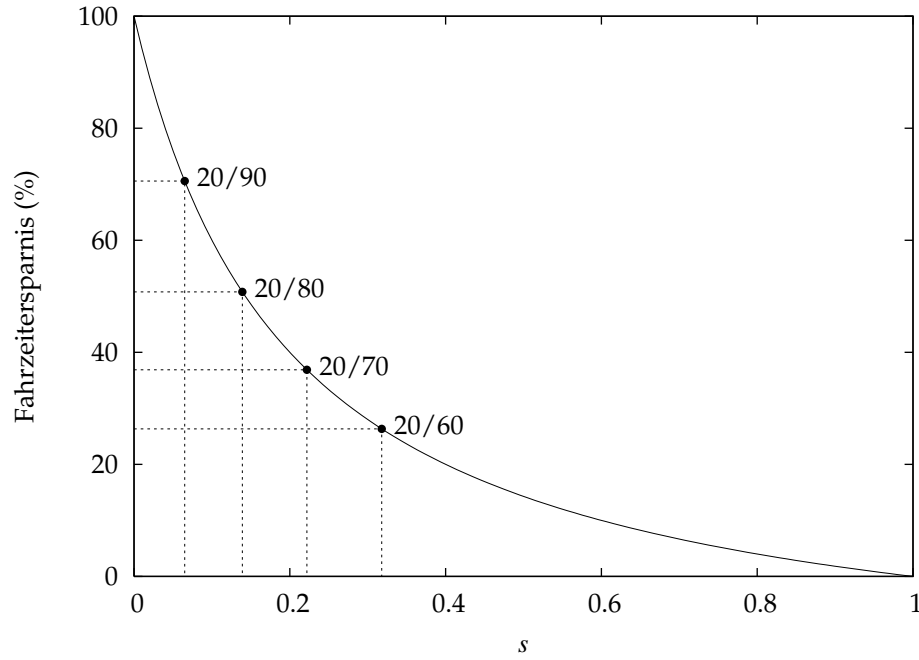


Abbildung 5.7.: Fahrzeiterparnis gegenüber gleichverteilten Durchsätzen

Die Umschlagsrate der k ten LE ist dann

$$r(k) = \sqrt{2D'_k/K} = \sqrt{2s/K} \cdot k^{(s-1)/(s+1)}. \quad (5.15)$$

HAUSMAN *et al.* greifen nun auf die Fahrzeitfunktion (4.9) zurück und erhalten die optimale mittlere Fahrzeit mit

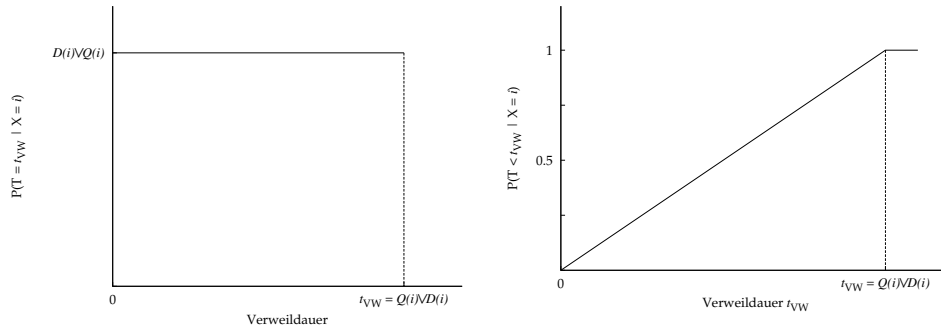
$$\overline{t_F} = \frac{\int_{j=0}^1 t_F(j)r(j)dj}{\int_{j=0}^1 r(j)dj} = \frac{4s}{(5s+1)}. \quad (5.16)$$

Abbildung 5.7 zeigt die prozentuale Fahrzeiterparnis in Abhängigkeit von der Ungleichverteilung der Durchsätze gegenüber gleichverteilter Nutzung der Lagerplätze.

5.4.3. Lagereinheitsbezogene Betrachtung

5.4.3.1. Verweildauer und gelagerte Menge

Der Umstand, dass verschiedene Lagereinheiten der Bestellmenge eines Artikels unterschiedliche Verweildauern aufweisen, erlaubt für sich betrachtet noch keine Reduktion der mittleren Spielzeit. Für jede einzelne Lagereinheit einer Bestellmenge wird ein eigener Lagerplatz benötigt, welcher während des Bestellintervalls genau ein Mal belegt wird. Innerhalb einer Be-


 Abbildung 5.8.: Verweildauerverteilung des Artikels i

stellmenge sind alle Verweildauern gleich häufig. Bei kontinuierlicher Betrachtung entspricht das der Verteilung

$$P(T = t_{VW} | X = i) = \begin{cases} \frac{D(i)}{Q(i)} & \text{für } 0 \leq t_{VW} \leq \frac{Q(i)}{D(i)} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.17)$$

$$P(T < t_{VW} | X = i) = \begin{cases} 0 & \text{für } t_{VW} < 0 \\ \frac{D(i)}{Q(i)} t_{VW} & \text{für } 0 \leq t_{VW} \leq \frac{Q(i)}{D(i)} \\ 1 & \text{für } t_{VW} > \frac{Q(i)}{D(i)} \end{cases} \quad (5.18)$$

im Moment des Eintreffens der Bestellung. Erst in Verbindung mit weiteren Artikeln, welche andere Bestellzyklen aufweisen, entsteht Optimierungspotential. Dadurch, dass Lagereinheiten kurzer Verweildauer einen Lagerort schnell wieder freigeben, wird dieser quasi zwischen- durch für die Lagerung von Lagereinheiten anderer Artikel verfügbar. Um dieses Verhalten abzubilden, muss man zu einer Aussage über die Verweildauern der Lagereinheiten eines Artikels gelangen, welche vom Beobachtungszeitpunkt unabhängig ist.

Die verschiedenen Lagereinheiten auf einem Lagerplatz formen einen Erneuerungsprozess. Eine Lagereinheit wird nach ihrer „Lebensdauer“, welche mit der Verweildauer identisch ist, durch eine neue Lagereinheit auf diesem Lagerplatz ersetzt⁸. Betrachtet man zu beliebigen Zeitpunkten einen Lagerort, wird die Verteilung der Verweildauern der dort beobachteten Lagereinheiten nicht der ursprünglichen Verweildauerverteilung im Strom der Lagereinheiten entsprechen. Dieser Umstand ist wiederum auf das bereits in Abschnitt 5.3.1 auf Seite 58 erwähnte „*paradox of residual life*“ zurückzuführen. Die Wahrscheinlichkeit, eine Verweildauer zu beobachten, ist direkt proportional zu dieser Verweildauer. Daraus ergibt sich nach entsprechender Normierung als Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine zu einem beliebigen Zeitpunkt angetroffene Lagereinheit des Artikels i die Verweildauer t_{VW} aufweist

$$f(t_{VW} | i) \hat{=} P(T = t_{VW} | X = i) = \begin{cases} \frac{2D(i)^2}{Q(i)^2} t_{VW} & \text{für } 0 \leq t_{VW} \leq \frac{Q(i)}{D(i)} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.19)$$

⁸Die Wiederbelegungszeit in einem perfekt balancierten Lager ist 0.

5. Dynamische Zonierung

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine beliebige Lagereinheit im Lager zu Artikel i gehört, lautet

$$p(i) = P(X = i) = Q(i) / \int_0^1 Q(i) di. \quad (5.20)$$

Nach dem Satz über die totale Wahrscheinlichkeit lässt sich die Verteilung der Verweildauern nach

$$F(t_{VW}) = \int_{-\infty}^{\infty} p(i) F(t_{VW}|i) di \quad (5.21)$$

berechnen. Alternativ kann diese Verteilung auch als Randverteilung der zweidimensionalen Verteilungsdichte bestimmt werden:

$$f(t_{VW}, i) = p(i) f(t_{VW}|i). \quad (5.22)$$

Aus (5.19), (5.20) und (5.22) ergibt sich für die Verteilungsdichte der Verweildauern:

$$f(t_{VW}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t_{VW}, i) di. \quad (5.23)$$

Die diskrete Betrachtung lagereinheitsbezogener Verweildauern von GOETSCHALCKX und RATLIFF lässt sich so auf eine kontinuierliche Situation übertragen. Analog zur Vorgehensweise von HAUSMAN *et al.* muss die Umschlagsrate an jeder Position im Lager bestimmt werden. Dabei haben die Verweildauern der einzelnen Lagereinheiten sowohl Einfluss auf den Lagerort als auch auf die Umschlagsrate an diesem Ort. Um diesen Einfluss zu quantifizieren, muss aus dem Sortiment die Verweildauerverteilung hergeleitet werden.

5.4.3.2. Identische Artikel

Der Einfachheit halber soll zunächst der Fall voneinander unabhängig disponierter, durchsatzidentischer Artikel betrachtet werden. Dieser Fall ist die kontinuierliche Verallgemeinerung des Beispiels aus Abbildung 5.2, ein perfekt balanciertes Lager.

Bei Lagerung identischer Artikel wird die Lorenzkurve zur Geraden und der Gini-Koeffizient ist 0 ($s = 1$).

$$G(i) = i. \quad (5.24)$$

Die artikelbezogenen Durchsätze ergeben sich aus

$$G(i) = \int_0^i D(j) dj / \int_0^1 D(j) dj. \quad (5.25)$$

Bei $\int_0^1 D(j) dj = 1$ wird $D(i) = 1$ mit der optimalen Bestellmenge $Q(i) = \sqrt{2K}$. Nach (5.20) ist die Wahrscheinlichkeit, eine Lagereinheit mit der Verweildauerverteilung des Artikels i anzutreffen

$$p(i) = 1, \quad (5.26)$$

da alle Artikel identische Verteilungen aufweisen.

Bis hierher entspricht die Berechnung einem degenerierten Sonderfall der Berechnung von HAUSMAN *et al.* Bei der Berechnung der Lagerplatzindizes k tritt der entscheidende Unterschied auf. Bei der Bestimmung des Lagerortes einer Lagereinheit tritt an die Stelle der Abhängigkeit vom Artikel i und dessen gelagerter Menge, die Abhängigkeit von der Verweildauer der Lagereinheit. Nach Einsetzen von $D(i)$ und $Q(i)$ in (5.19) lautet die (bedingte) Verteilungsdichte der Verweildauer

$$f(t_{VW}|i) = f(t_{VW}) = \begin{cases} \frac{t_{VW}}{K} & \text{für } 0 \leq t_{VW} \leq \sqrt{2K} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (5.27)$$

Wegen der Identität der Artikel ist diese Verteilungsdichte bereits vom Artikel unabhängig⁹. Bildet man das Intervall der Verweildauern t_{VW} auf den Verweildauerindex j im Intervall $[0,1]$ ab, ergibt sich folgende (bedingte) Verteilungsdichte für die Verweildauern:

$$f(j) = \begin{cases} \frac{j}{2} & \text{für } 0 \leq j \leq 1 \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (5.28)$$

Aus der zugehörigen Verteilungsfunktion lässt sich nun ablesen, an welcher Position im Lager (Index k) Lagereinheiten mit einer bestimmten Verweildauer (Index j) gelagert werden:

$$F(j) = k(j) = \begin{cases} 0 & \text{für } t_{VW} < 0 \\ j^2 & \text{für } 0 \leq t_{VW} \leq 1 \\ 1 & \text{für } 1 < j. \end{cases} \quad (5.29)$$

Die Umschlagsrate an einem Lagerort ergibt sich als Kehrwert der Verweildauer. Mittels Umstellung der Verteilungsfunktion der Verweildauern lässt sich die Umschlagsrate letztlich auch auf einen Lagerort beziehen:

$$j(k) = \sqrt{k}, \quad (5.30)$$

$$r(k) = \frac{1}{j(k)} = \frac{1}{\sqrt{k}}. \quad (5.31)$$

Nach Einsetzen der Umschlagsrate (5.31) und der Fahrzeit (4.9) in die Fahrzeitformel (5.16) erhält man als mittlere Fahrzeit in einem Lager mit Formfaktor 1 bei identischen Artikeln mit lagereinheitsbezogenen Verweildauern

⁹Nach (5.20) ist die Artikelwahrscheinlichkeit $f(i) = 1$. In Verbindung mit (5.23) erhält man ebenso dieses Ergebnis.

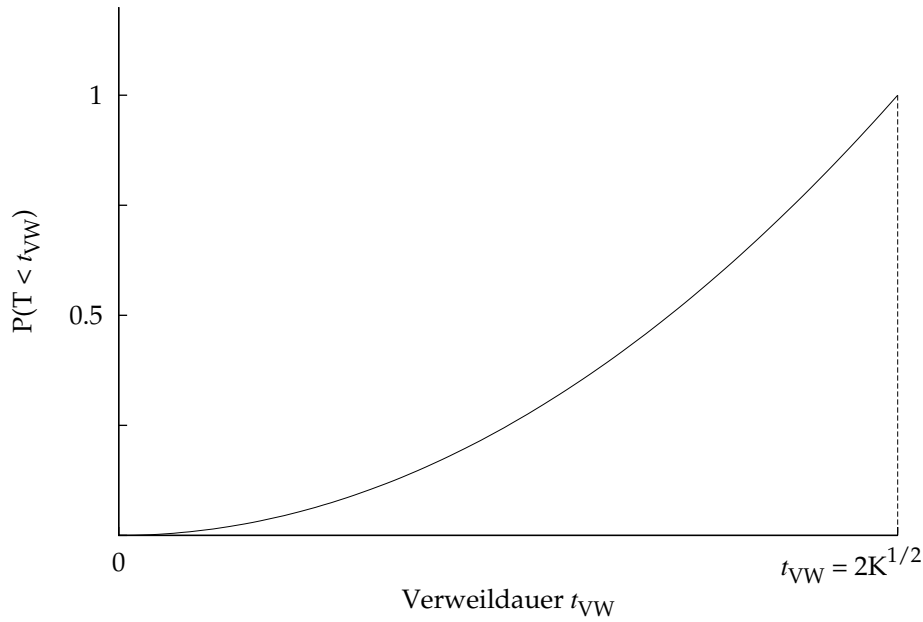


Abbildung 5.9.: Lagermengenquantil in Abhängigkeit von der Verweildauer

$$\overline{t_F} = \frac{\int_0^1 1 dk}{\int_0^1 \frac{1}{\sqrt{k}} dk} = \frac{1}{2}. \quad (5.32)$$

Das entspricht einer prozentualen Fahrzeiterparnis von 25% im Vergleich zu gleichverteilten Zugriffen. Diese Herleitung liefert den analytischen Nachweis für die von GOETSCHALKX und RATLIFF in [GR90] simulativ ermittelten Einsparungen in dieser Größenordnung.

5.4.3.3. Realistische Sortimente

Ein Sortiment, welches ausschließlich Artikel mit identischen Durchsätzen enthält, stellt kein realistisches Szenario dar. Praktisch werden die Durchsätze der Artikel meist unterschiedlich sein. Um diese Situation darzustellen, soll wieder eine Durchsatzverteilung, wie von HAUSMAN *et al.* beschrieben, zum Einsatz kommen. Dabei gestaltet sich die Berechnung der Verweildauerverteilung wesentlich komplexer. Die zweidimensionale Verteilungsdichte lautet nun

$$f(t_{VW}, i) = P(T = t_{VW}, X = i) = \begin{cases} \frac{2D(i)^2 t_{VW}}{Q(i) \int_0^1 Q(i) di} & \text{für } 0 < t_{VW} \leq \frac{Q(i)}{D(i)} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (5.33)$$

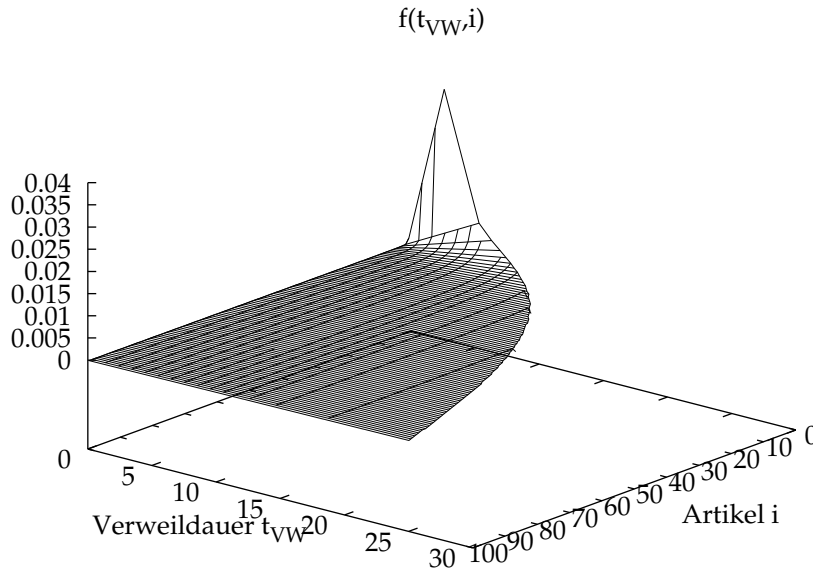


Abbildung 5.10.: Verteilungsdichte der Verweildauerverteilung

Dadurch ist diese Verteilungsdichte nicht mehr stetig innerhalb der Integrationsgrenzen und die Unstetigkeitsstellen sind vom kontinuierlichen i abhängig. Die Bestimmung der artikelunabhängigen Verweildauerverteilung nach Gleichung (5.23) scheitert. Deshalb muss eine Möglichkeit gefunden werden, dennoch eine integrierbare Form dieser Randverteilung zu bestimmen.

Bei der (diskreten) Berechnung eines konkreten Sortiments mit hoher Artikelanzahl fällt die große Ähnlichkeit der Verweildauerverteilung mit einer Beta-Verteilung ins Auge. Anscheinend lässt sich die Verteilung der Verweildauern durch eine Beta-Verteilung approximieren (s. Abbildung 5.11). Der Fall identischer Artikel entspricht beispielsweise einer $B(2, 1)$ -Verteilung.

Für ausgewählte Werte von s wurden deshalb die Parameter der Beta-Verteilung $B(a, b)$ geschätzt. Dazu wurde jeweils eine Stichprobe ($n = 100000$) per Monte-Carlo-Simulation gezogen. Für die entstehenden Histogramme mit je 25 Klassen im Intervall $[0, t_{Fmax}]$ wurden die Parameter der Beta-Verteilung mit der Minimum-Chi-Quadrat-Methode geschätzt [Bos98, S. 375]. Die geschätzten Beta-Funktionen passieren einen Chi-Quadrat-Anpassungstest nur in Einzelfällen. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da als Basis für die Monte-Carlo-Simulation ein Sortiment mit 1000 Artikeln verwendet wurde. Diese Diskretisierung führt insbesondere bei sehr starker Ungleichverteilung im Sortiment zu Abweichungen zwischen der vorgefundenen, wahren Verweildauerverteilung für 1000 Artikel und der idealisierenden Beta-Verteilung. Dennoch erscheint die Approximation mittels Beta-Verteilung angemessen. In Anhang A befinden sich die Histogramme mit den zugehörigen Beta-Funktionen.

Bei den in Abbildung 5.12 dargestellten, geschätzten Parametern ist auffällig, dass über weite Wertebereiche von s der Parameter b kaum von 2 abweicht. Dies gilt insbesondere im

5. Dynamische Zonierung

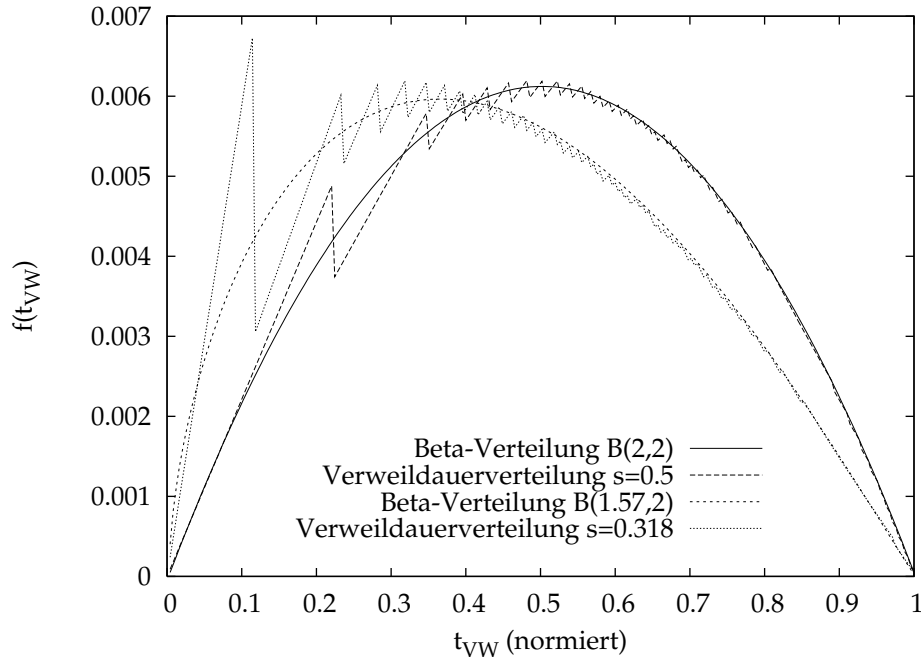


Abbildung 5.11.: Verweildauerverteilungsdichte bei 100 Artikeln mit nach $G(i) = i^s$ verteilten Durchsätzen

praktisch besonders relevanten Bereich von s zwischen $s = 0.5$ und $s = 0.065$. Die Parameterschätzung wurde deshalb für $B(a, 2)$ wiederholt. Dabei wird ein nahezu perfekter linearer Zusammenhang offensichtlich. Die Gleichung der Regressionsgeraden lautet

$$a = 2.456s + 0.826 \quad (5.34)$$

Nimmt man die für den Parameter a approximierten Werte näher in Augenschein, fällt auf, dass a bei $s = \frac{1}{4}$ bis auf die 4. Nachkommastelle $\sqrt{2}$ beträgt und bei $s = \frac{1}{2}$ durch 2 verläuft¹⁰. Auf Basis dieser Beobachtung lässt sich mit Hilfe der der Zweipunktgleichung der Geraden [BS91, S. 219] die Formel

$$a = 4(2 - \sqrt{2})s + 2(\sqrt{2} - 1) \quad (5.35)$$

$$= 2.343s + 0.828 \quad (5.36)$$

berechnen. Die mittlere quadratische Abweichung dieser Näherung ist im Intervall $s[0, 0.5]$ geringer als diejenige der ursprünglichen Regressionsgeraden. Die verschiedenen Funktionsverläufe sind ebenfalls in Abbildung 5.12 darstellt.

Im praktisch relevanten Bereich verhindert die gute Überdeckung der Kurven bessere Lesbarkeit. Die Darstellungsqualität lässt sich auch durch Einschränkung der dargestellten Definitionsbereiche nicht verbessern.

¹⁰Lediglich die Regressionsgeraden verlaufen nicht exakt durch die genannten Punkte. Die Originalschätzwerte (!) für a betragen 1.414214 bei $s = 0.25$ und 2.008158 bei $s = 0.5$.

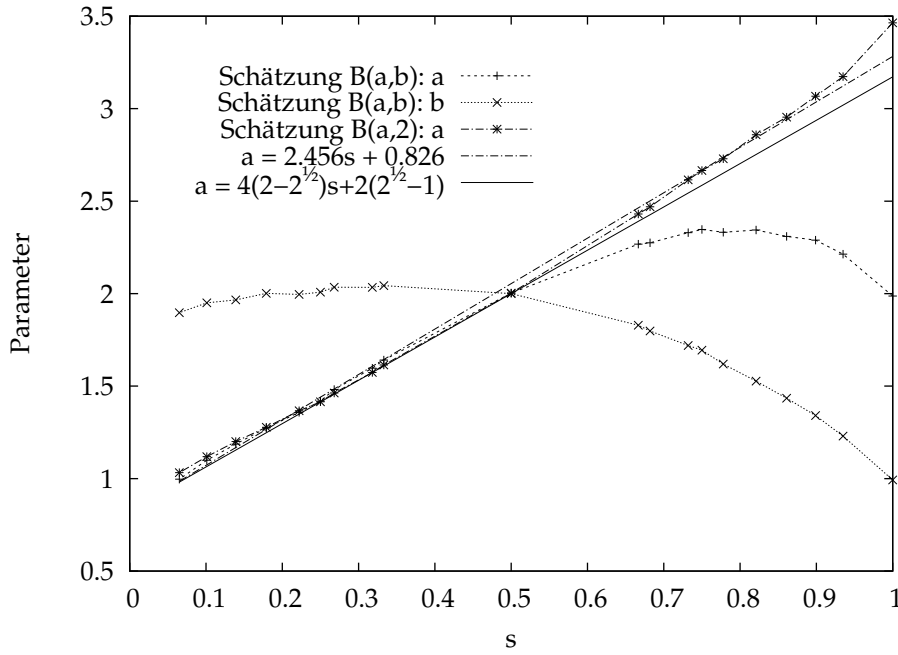


Abbildung 5.12.: Bestimmung der Parameter der Betaverteilung

Durch die Approximation mit einer Beta-Verteilung erhält man eine wenigstens numerisch integrierbare Form der Verweildauerverteilungsdichte, nämlich $B(4(2 - \sqrt{2})s + 2(\sqrt{2} - 1), 2)$. Im Folgenden wird diese Funktion mit $V(s)$ bezeichnet. Mit Hilfe dieser Verteilung der Verweildauern lässt sich die Verweildauer an der Position k und damit auch die dortige Umschlagsrate berechnen:

$$L(= 1) = \int_0^{\frac{Q(1)}{D(1)}} V(s) dt_{VW} . \quad (5.37)$$

Nach der Normierung $\frac{Q(1)}{D(1)} = 1$ ergibt sich

$$k(i) = \int_0^i V(s) dt_{VW} . \quad (5.38)$$

Unter Verwendung der Inversen $i(k)$ dieser Verteilungsfunktion wird die Umschlagsrate $\frac{1}{i(k)}$ an Position k realisiert. Die mittlere Fahrzeit in einem Lager mit Formfaktor 1 ist dann

$$\bar{t}_F = \frac{\int_0^1 \sqrt{k} \frac{1}{i(k)} dk}{\int_0^1 \frac{1}{i(k)} dk} \quad (5.39)$$

ganz analog zu Gleichung (5.16). In einem 20/60-verteilten Sortiment beträgt die mittlere

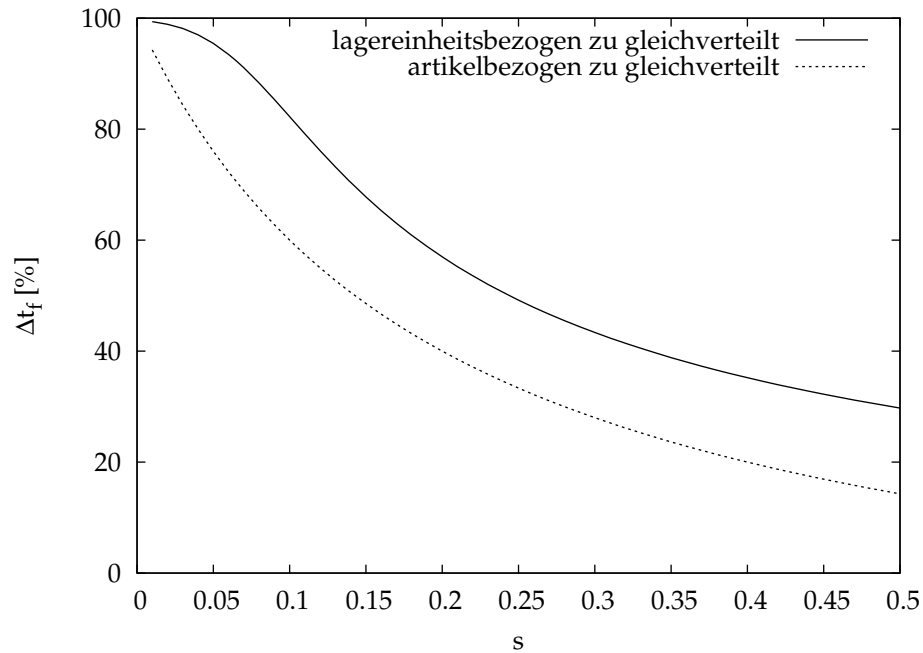


Abbildung 5.13.: Relative Fahrzeiterparnis bei unterschiedlichem Verweildauerbezug

Fahrzeit nun 0.389 statt 0.491. Dies entspricht einer Einsparung gegenüber der artikelbezogenen Betrachtungsweise von 20.7% und gegenüber gleichverteilter Zuweisung von 41.6%. In Abbildung 5.13 sind die Leistungsunterschiede verzeichnet, welche sich beim Übergang von artikelbasierter zu lagereinheitsbasierter Betrachtung ergeben.

5.5. Simulationsergebnisse

5.5.1. Lagerverwaltungssimulation mit WMSim

Die *praktische* Leistungsfähigkeit der Schnellläuferstrategien lässt sich ohne Simulation kaum beurteilen. Insbesondere die Effekte, welche durch die wechselnde Belegung im Lager und die schwankende Kapazitätsausschöpfung entstehen, können durch die analytischen Betrachtungen nicht erfasst werden.

Für die Untersuchungen war ursprünglich der Einsatz von Standardsoftware geplant. Dabei sind durch die Software sehr unterschiedliche Anforderungen zu erfüllen. Einerseits muss eine große Anzahl Entscheidungen möglichst effizient verwaltet und abgearbeitet werden und andererseits sind mit der Verwaltung der Sortimente und Bestände typische Datenbankaufgaben zu bewältigen. Eine per ActiveX gekoppelte ereignisdiskrete Simulationssoftware AutoMod und die Datenverwaltungssoftware MS Access sollten diese Aufgaben erfüllen. Praktisch ist diese Kombination nicht geeignet, da ca. 30% der Systemleistung (PC) allein für die Kommunikation der Komponenten benötigt werden.

Statistische Auswertungen werden dadurch erschwert, dass die benötigten Daten in ver-

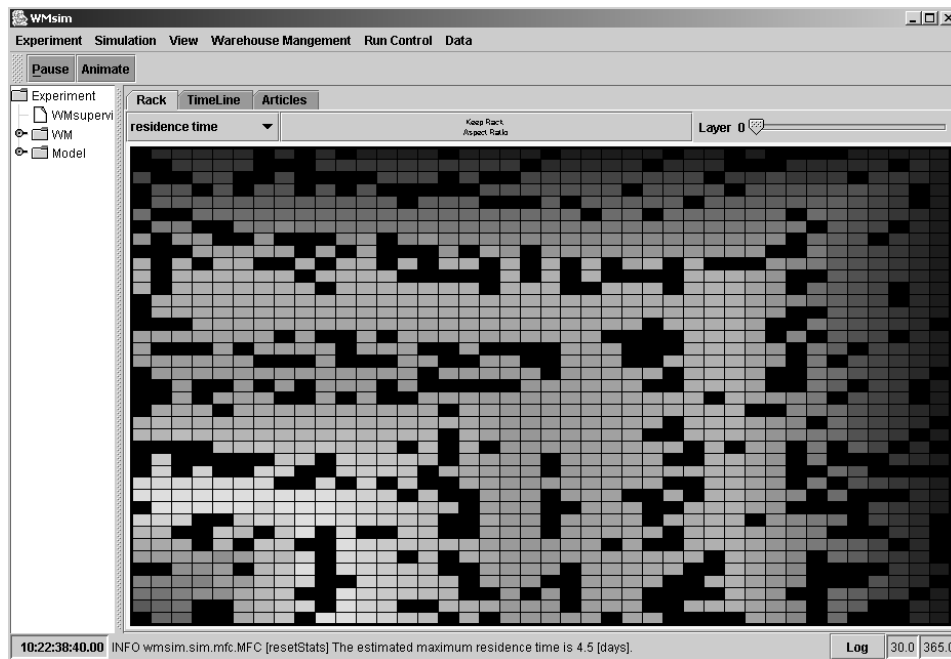


Abbildung 5.14.: WMSim Benutzeroberfläche und Simulation

schiedenen Anwendungen vorliegen. Die Pflege geeigneter Schnittstellen zum Datenaustausch ist zu aufwendig.

Aus diesen Gründen wurde die speziell auf die Simulation des Lagerbetriebes zugeschnittene Software WMSim erstellt (s. Abb. 5.14). WMSim ist modular aufgebaut, in Java implementiert und bildet mit seinen Komponenten die Bestandteile von Warenwirtschafts- und Lagerverwaltungssystemen strukturell und funktional nach (s. Abb. 5.15). Die Komponenten wurden durch statistische Auswertungsmodule erweitert und werden innerhalb einer ereignisdiskreten Simulation betrieben. Die Datenhaltung erfolgt in einer zentralen SQL-Datenbank auf die mehrere Instanzen der Simulationssoftware zugreifen können. Dies ermöglicht verteilte Simulation.

Damit ähnelt die Struktur des Simulationsmodells der von CHEN und GHOSH vorgeschlagenen Struktur [CG97], erweitert diese aber um materialflusstechnische Aspekte.

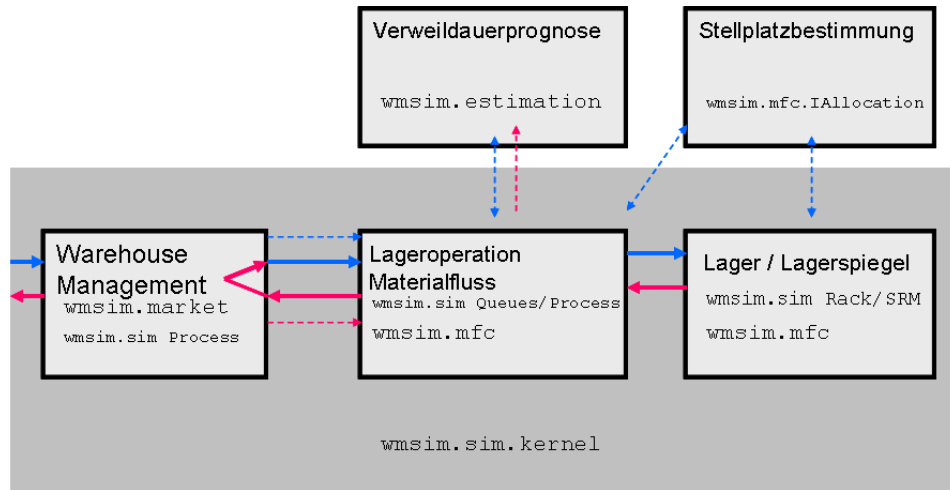


Abbildung 5.15.: WMSim Komponenten

5.5.2. Modell¹¹

5.5.2.1. Sortiment

Für die Simulationsexperimente wurde ein Modell entsprechend der Annahmen 1–7 aus Abschnitt 5.4.1 verwendet. Jede einzelne Lagereinheit enthält eine Artikeleinheit.

Die Kinematik des Regalbediengerätes wurde so gewählt, dass sich immer Formfaktor 1 einstellt und die maximale Fahrzeit eine Zeiteinheit beträgt. Die Referenzfahrzeit der GV-Strategie beträgt damit immer 2/3 und die Fahrzeiterparnis ist jeweils zu dieser relativ angegeben. Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge wurden vernachlässigt.

Für die Simulation der Sortimente mit 100 Artikeln wurde für alle Simulationsläufe eine mittlere Lagermenge von 1000 Lagereinheiten eingestellt und verwendet. Dies erfolgte über die geeignete Wahl des Bestellkosten-Lagerkosten-Quotienten K . Bei den Sortimenten mit 1000 Artikeln wurde eine mittlere Lagermenge von 2000 Lagereinheiten gewählt. Bei Lagerhaltigkeit aller Artikel ist von der überwiegenden Mehrheit des Sortiments nur noch eine Lagereinheit gelagert. Im Sortiment 60/20 haben 99% der Artikel Bestellmengen von weniger als 10 Lagereinheiten. Die Simulation unterschiedlicher Lagerfüllgrade erfolgte durch Anpassung der Fach- und Ebenenanzahl des Lagerregals.

Jeder einzelne Artikel in den Sortimenten wird nach dem Grundmodell der optimalen Bestellmenge disponiert, wobei der Planungshorizont ein Quartal beträgt. Der Durchsatz jedes einzelnen Artikels wird durch Gleichung (5.5) bestimmt. Die Bestellungen für jeden Artikel (Abgangsrate) erfolgen unabhängig voneinander in exponentialverteilten Abständen, so dass

¹¹Beim „Modell“ handelt es sich nicht um das dem Softwaredesign zugrundeliegende Modell, sondern um das tatsächlich zur Untersuchung der Schnellläuferstrategien verwendete. Die Fähigkeiten von WMSim sind in letzterem vielfach ungenutzt geblieben. Zu nennen sind die vollständige Modellierung der Geometrie des Lagers, der Kinematik der Regalbediengeräte, der leitrechnerinternen Auftragsverbuchung, der Verwaltung von Ladungsträgerklassen und Kapazitäten mit Aus- und Rückeinlagerung von Anbruch-Ladungsträgern oder der Pufferung angebrochener Ladungsträger in der Vorzone, sowie die automatisierte Disposition und Wiederbeschaffung unter Berücksichtigung von Wiederbeschaffungszeiten, Sicherheiten und Sicherheitsbeständen.

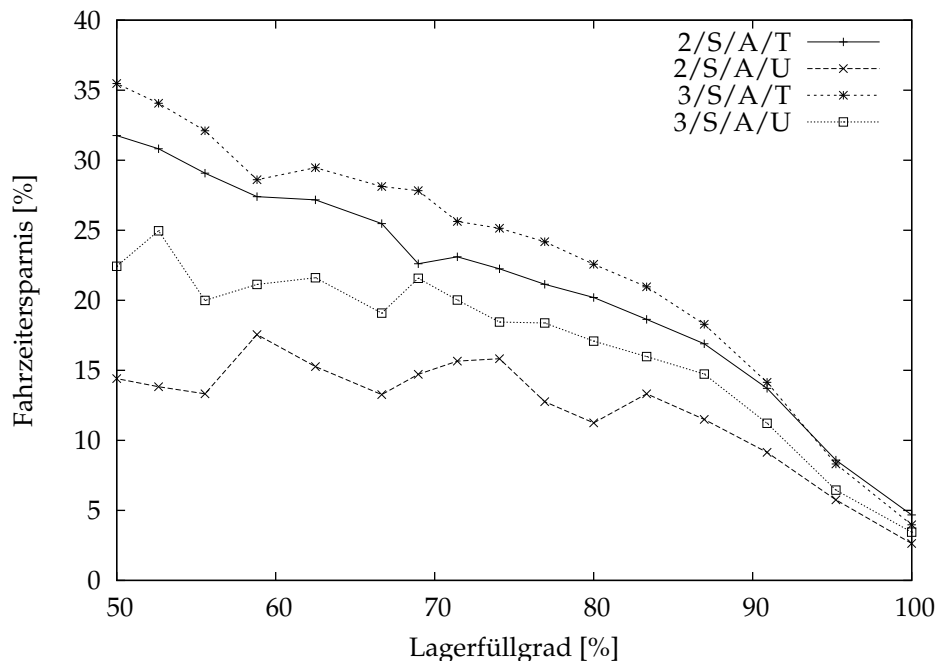


Abbildung 5.16.: 100 Artikel – GV vs. KFZ innerhalb der Zonen

sich der gewünschte Durchsatz einstellt. Ist der Bestand eines Artikels erschöpft, erfolgt ohne Zeitverzug die Lieferung einer Bestellmenge dieses Artikels.

5.5.2.2. Strategien

Die Umsetzung der GV- und der KFZ-Strategie ohne Zonierung ist trivial. Bei den klassenbasierten Strategien wurden innerhalb einer Zone sowohl GV als auch KFZ eingesetzt. Da sich KFZ innerhalb einer Zone als überlegen erwiesen hat (Abb. 5.16 und 5.17), wurde diese Strategie eingesetzt, soweit nichts anderes angegeben ist. Bei nur zwei Zonen wurde die optimale Zoneneinteilung nach HAUSMAN *et al.* berechnet und angewandt [HSG76]. Für die Festlegung der Zonengrenzen bei drei Zonen wurde auf die Optimierung in einem gesonderten Verfahren verzichtet und stattdessen analog zu HAUSMAN *et al.* die Zonengrenzen bei dem 0.1- und beim 0.5-Quantil der Verweildauerverteilung festgelegt. Die notwendigen Zonenkapazitäten wurden berechnet und zugeteilt. Diese Werte versprechen gute Ergebnisse in den untersuchten Bereichen der Ungleichverteilung der Durchsätze im Sortiment. In den Untersuchungen mit dynamischen Sortimenten wurden die Grenzverweildauern¹² im Tages-, Wochen- und Monatsrhythmus angepasst.

Bei der Dynamischen Zonierung wurden über die Vorzugsvariante hinaus auch noch die verschiedenen Varianten der Verweildauerbestimmung und Auswahl der Alternativstellplätze untersucht. Die Ergebnisse dieser Simulationsläufe sind nicht gesondert aufgeführt.

Die artikelbasierte Verweildauerbestimmung erfolgte direkt aus den Artikelstammdaten. Für die lagereinheitsbezogene Verweildauerbestimmung wurden jeweils in einem vorgelager-

¹²Diese sind die Grenzen der Verweildauerintervalle, welche die Zonenzuordnung festlegen.

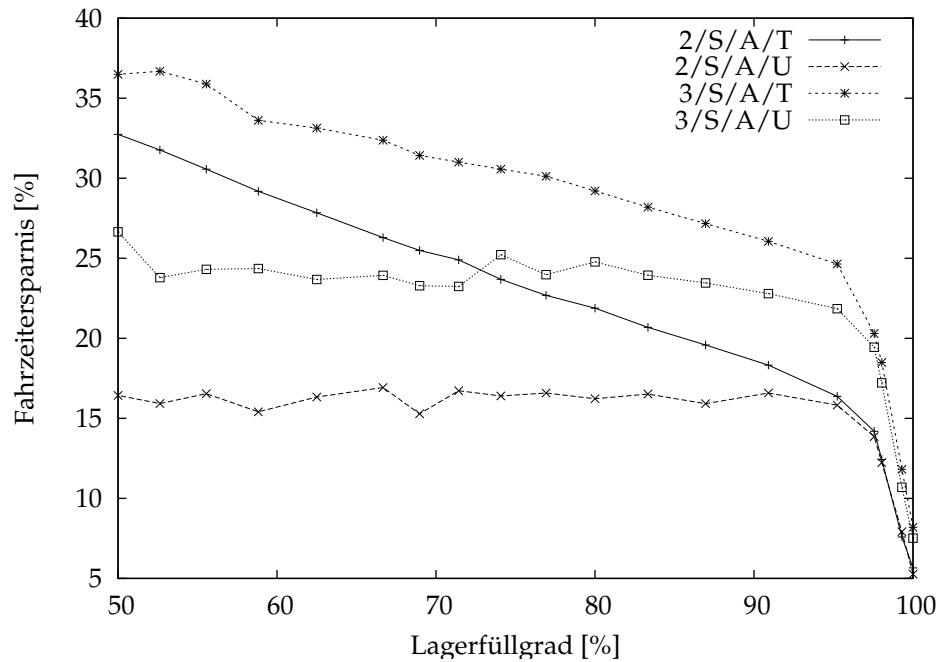


Abbildung 5.17.: 100 Artikel – GV vs. KFZ innerhalb der Zonen

ten Simulationslauf die auftretenden Ein- und Auslagerzeitpunkte aufgezeichnet. Diese Aufzeichnung wurde im folgenden Simulationslauf zur Erzeugung der Ein- und Auslageraufträge eingesetzt. Dadurch waren die tatsächlichen Verweildauern bereits zum Einlagerzeitpunkt bekannt und ein Prognoseeinfluss ausgeschlossen, ohne dass dabei gleichzeitig die Stochastik des Lagerbetriebes im Modell beeinträchtigt wurde. Auf die Verweildauerprognose wird in Kapitel 6 eingegangen.

5.5.2.3. Simulationsläufe

Die Sortimente wurden jeweils über einen Zeitraum von 480 Tagen simuliert. Dabei wurden die Ergebnisse der ersten 30 Tage nicht mit in die Auswertung einbezogen. Die Initialisierung der anfangs gelagerten Menge pro Artikel erfolgte zufällig gleichverteilt zwischen 1 und der Bestellmenge. Für jeden Datenpunkt wurden mindestens 3 Simulationsläufe durchgeführt. Bei der Simulation klassenbasierter Strategien wurde die Festlegung der Zonengrenzen am 15. Tag der Simulation anhand des zu diesem Zeitpunkt gelagerten Lagerbestandes vorgenommen.

Die Simulation bildet den Materialfluss im Lager inklusive der Operationen des Regalbediengerätes korrekt ab. Falls möglich führt das Regalbediengerät Doppelspiele aus. Der Übergabe-/Übernahmepunkt (I/O) befindet sich an einer unteren Ecke des Lagerregals. Die Bestände im Lager werden ortsbezogen verwaltet. Bei anstehenden Lageroperationen werden die entsprechenden Fächer gesperrt.

Für die Auswertung der Simulationsläufe wird die einfache Einzelspielfahrzeit verwendet, was direkten Vergleich der Simulationsergebnisse mit den analytisch erzielten Ergebnissen ermöglicht.

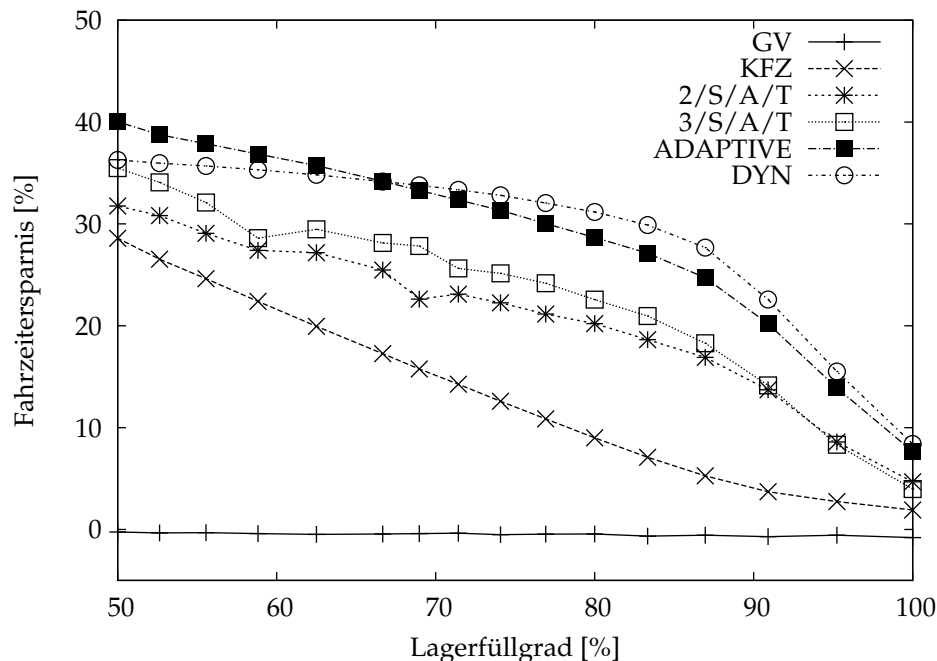


Abbildung 5.18.: Fahrzeiterparnis bei unterschiedlichen Lagerfüllgraden (100 Artikel 60/20 $s = 0.318$)

5.5.3. Statische Sortimente

5.5.3.1. Lagerfüllgrad

Die Abbildungen 5.18 und 5.19 stellen die erreichbare Fahrzeiterparnis in Abhängigkeit vom Lagerfüllgrad dar. Die Legende folgt der Systematik aus Abschnitt 4.5.1 auf Seite 46.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich eine Reihe von Schlüssen ziehen:

1. Mit größerer Artikelanzahl bleiben Schnellläuferstrategien auch bei höheren Lagerfüllgraden effektiv. Dass Schnellläuferstrategien ohne verfügbare Lagerorte kein Optimierungsspielraum bleibt, ist einleuchtend.
2. Mit größerer Artikelanzahl wächst auch das Optimierungspotential. Es entspricht im Sortiment mit 1000 Artikeln und $s = 0.318$ dem theoretisch ermittelten Optimierungspotential.

Die Ursache für die besseren Resultate des breiteren Sortiments sind in der besseren Balanciertheit des Lagerbetriebs zu suchen. Bei größerer Artikelanzahl können sich die Bestandschwankungen besser ausgleichen und die Bestellmengen einzelner Artikel fallen gegenüber der Zonen- bzw. Lagerkapazität weniger ins Gewicht.

3. Die Dynamische Zonierung fällt bei geringen Lagerfüllgraden hinter andere Strategien zurück. Die Ursache hierfür besteht darin, dass die Dynamische Zonierung ähnlich GV alle Lagerplätze einbezieht, anstatt nur die fahrtzeitgünstigeren zu verwenden. Dieses

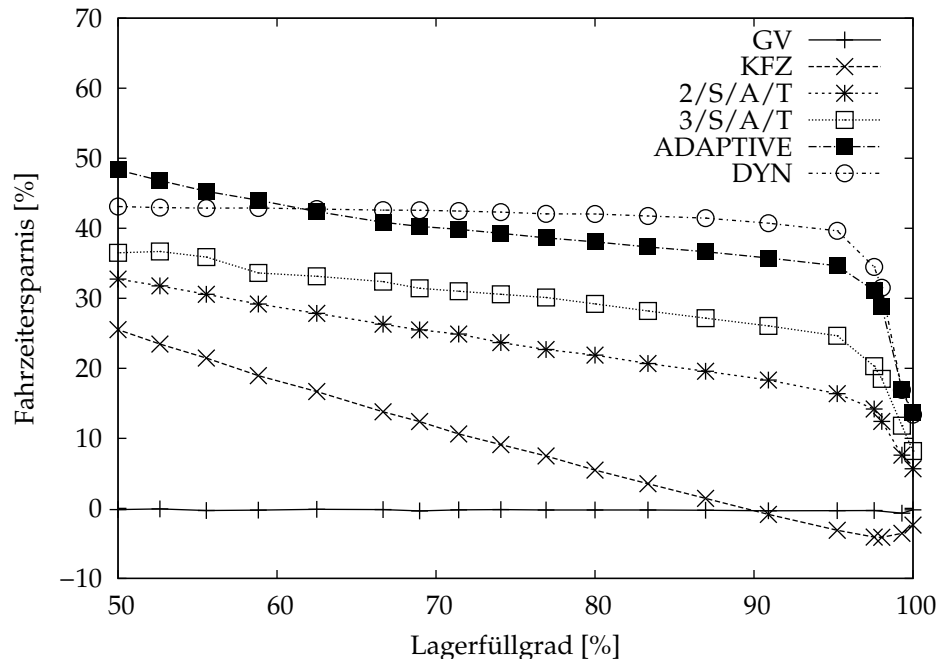


Abbildung 5.19.: Fahrzeiterparnis bei unterschiedlichen Lagerfüllgraden (1000 Artikel 60/20 $s = 0.318$)

ungünstige Verhalten kann dadurch verbessert werden, dass das Quantil der Verweildauerverteilung erst nach einer Skalierung für die Bestimmung eines Lagerortes eingesetzt wird.

- Die Dynamische Zonierung ist die leistungsfähigste Strategie. Dies ist auch dann der Fall, wenn für die klassenbasierten Strategien lagereinheitsbasierte Verweildauern eingesetzt werden. Werden dagegen für die Dynamische Zonierung Verweildauern auf Artikelbasis eingesetzt, ist die Leistungsfähigkeit der Dynamischen Zonierung vergleichbar mit der der 3-Zonen-Strategie (s. Abb. 5.22 und 5.23).

Die Varianz der beobachteten mittleren Fahrzeiten von Simulationslauf zu Simulationslauf ist gering. Lediglich bei den zonenbasierten Strategien kommt es zu größeren Schwankungen der Ergebnisse. Diese sind auf die Art und Weise der Initialisierung der Zonengrenzen zurückzuführen. Je nachdem, wie gut die Lagersituation zum Zeitpunkt der Initialisierung der Zonengrenzen den mittleren Zustand repräsentiert, sind die Verweildauergrenzen mehr oder weniger angemessen. Die Schwankungsbreite wird größer, wenn sich die Initialisierung mit geringeren Lagerfüllgraden auf weniger Werte stützen muss.

5.5.3.2. Ungleichverteilung des Sortiments

Die Auswirkungen der Ungleichverteilung der Durchsätze im Sortiment weichen von bisher veröffentlichten Ergebnissen ab. Anfangs überraschend ist vor allem die weitgehende Un-

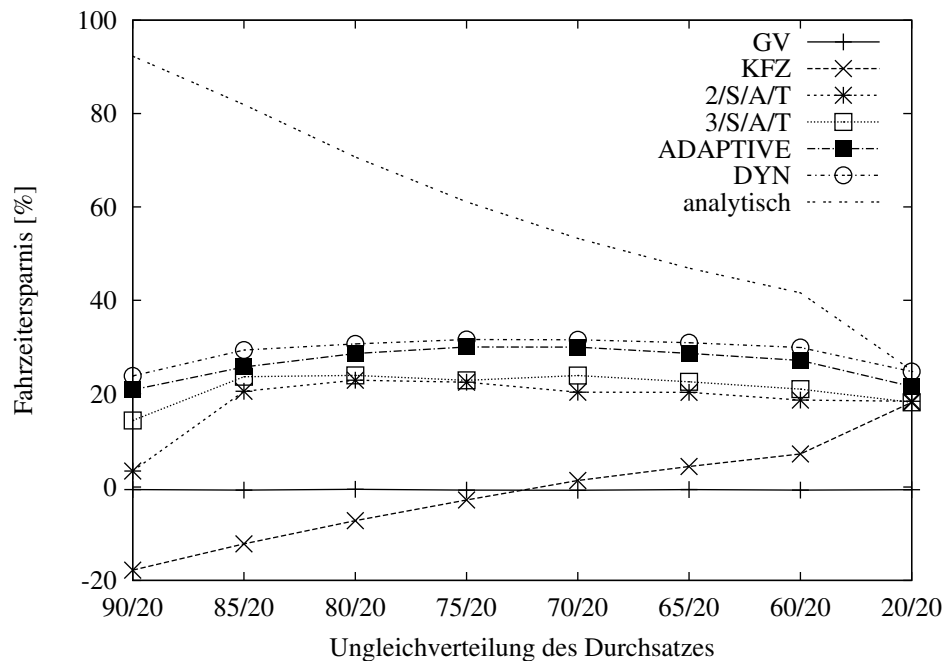


Abbildung 5.20.: 100 Artikel bei 83% Lagerfüllgrad

abhängigkeit des Strategiegewinns von der Ungleichverteilung der Durchsätze im Sortiment (s. Abb. 5.20 und 5.21).

Die Ursache für dieses den analytischen Berechnungen widersprechende Resultat ist wiederum im Grad der Balanciertheit des Lagerbetriebes zu suchen. Ohne Einbeziehung der Disposition der Artikel können diese Effekte nicht beobachtet werden. Die höheren Optimierungspotentiale, welche sich bei stärkerer Ungleichverteilung der Durchsätze ergeben, werden durch Leistungsverluste wegen des unbalancierteren Lagerbetriebes kompensiert. Für diesen Umstand spricht auch, dass die Leistungsverluste beim *per se* balancierteren, breiteren Sortiment geringer ausfallen. Im Sortiment mit 1000 Artikeln ist noch eine schwache Zunahme des Optimierungspotentials bei stärkerer Ungleichverteilung zu verzeichnen.

Für die Lagerdimensionierung bedeutet die geringe Sensitivität gegenüber der Ungleichverteilung im Sortiment praktischerweise, dass auf eine exakte Bestimmung des Ungleichverteilungs-Parameters s verzichtet werden kann. Auch wenn sich der Parameter s mit der Zeit verändern sollte, muss dadurch mit keiner merklichen Auswirkung auf die Lagerleistung gerechnet werden. Robustheit des Strategiegewinns ist damit in dieser Hinsicht gegeben.

Die Dynamische Zonierung kann auch nach diesem Kriterium höhere Fahrzeiterparnisse nachweisen als andere Strategien.

5.5.3.3. Lagereinheitsbasierte vs. artikelbasierte Verweildauer

Nachdem in den beiden vorhergegangenen Abschnitten Vorteile der Dynamischen Zonierung, und mit Abstrichen auch der adaptiven Strategie von GOETSCHALCKX und RATLIFF, gegen-

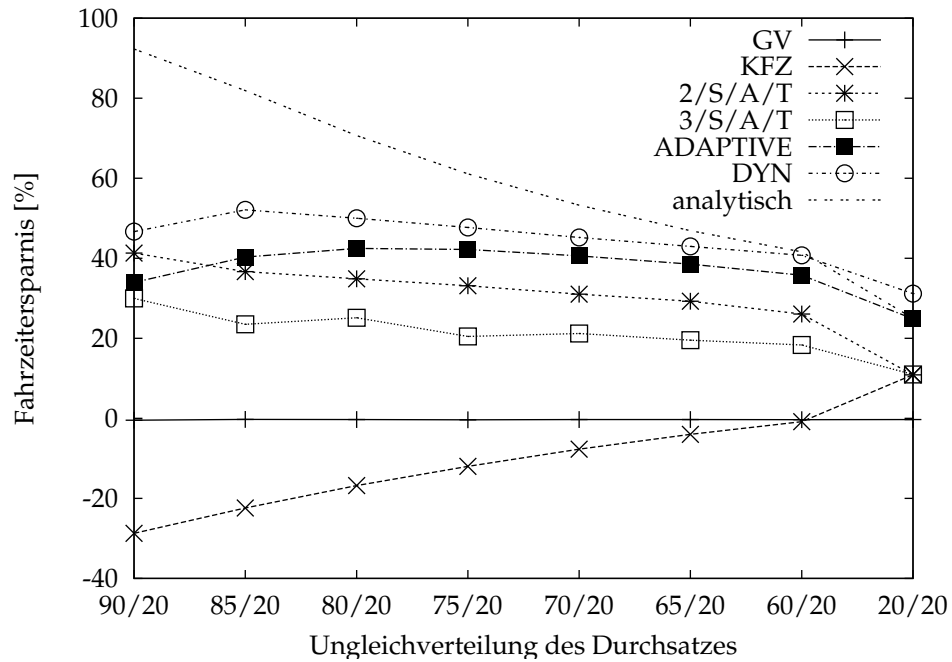


Abbildung 5.21.: 1000 Artikel bei 91% Lagerfüllgrad

über der klassischen Zonenbildung nachgewiesen wurden, stellt sich die Frage, welcher Anteil des Strategiegewinns auf die kontinuierliche Abbildung und welcher auf die lagereinheitsbasierte Betrachtung zurückzuführen ist. Zu diesem Zweck wurden einige Strategien sowohl mit lagereinheitsbasierten als auch mit artikelbasierten Verweildauern simuliert. In den Abbildungen 5.22 und 5.23 sind die Ergebnisse dargestellt.

Bei artikelbasierter Verweildauer fällt die Dynamische Zonierung auf das Niveau einer klassischen 3/S-Strategie zurück. Beim Wechsel auf lagereinheitsbasierte Betrachtung profitiert die Dynamische Zonierung davon jedoch doppelt so stark wie die 3/S-Strategie. In einem 60/20-Sortiment mit 1000 Artikeln bei 90% Lagerfüllgrad ist der Vorsprung der Dynamischen Zonierung gegenüber 3/S/A etwa zu gleichen Teilen auf die einerseits kontinuierliche und andererseits lagereinheitsbasierte Betrachtung zurückzuführen. Im Allgemeinen gewinnen die Strategien stärker durch die lagereinheitsbasierte Betrachtung als durch mehr Zonen bzw. kontinuierliche Betrachtung.

5.5.3.4. Gleichverteilungsstrategie vs. Kürzeste-Fahrzeit-Strategie

Bezüglich der Äquivalenz von Gleichverteilungsstrategie (GV) und Kürzester-Fahrzeit-Strategie (KFZ) ergibt sich aus der Literatur kein klares Bild [CS91]. Unter bestimmten Randbedingungen sind die Strategien tatsächlich identisch (z. B. bei [HSG76]). Ansonsten wird gemeinhin angenommen, dass sie zwar unterschiedlich sind, man sie aber als identisch behandeln könne (z. B. [SGH78, Lip03, S. 32]).

Die in Abbildung 5.18 und 5.19 auf Seite 86 sowie 5.20 und 5.21 dargestellten Ergebnisse verdeutlichen jedoch, dass dies keineswegs der Fall ist. Tatsächlich besteht eine deutli-

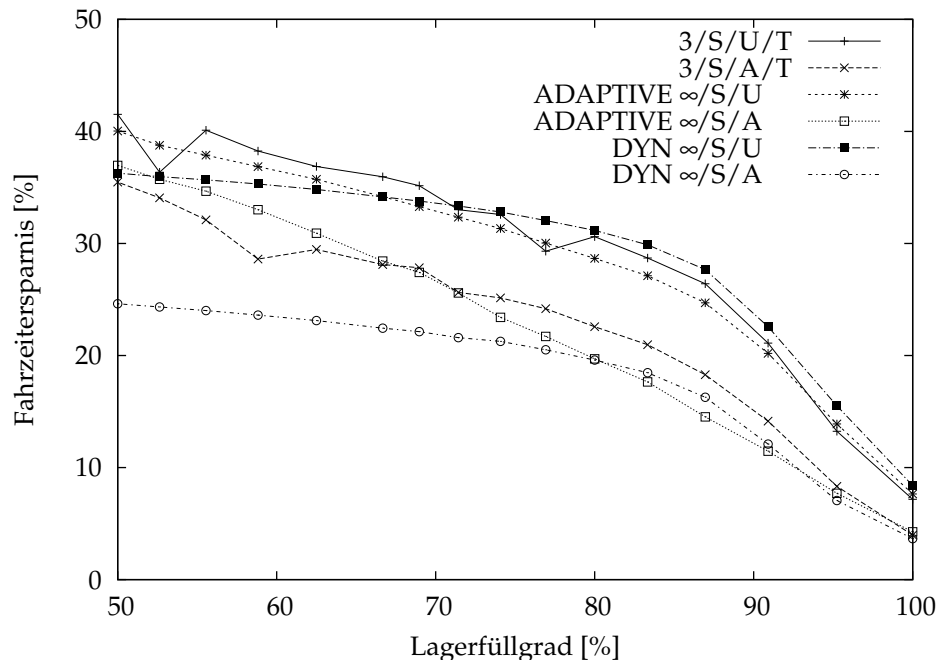


Abbildung 5.22.: 100 Artikel (60/20) – Leistungsunterschiede durch artikelbezogene oder lagereinheitsbezogene Verweildauerbestimmung

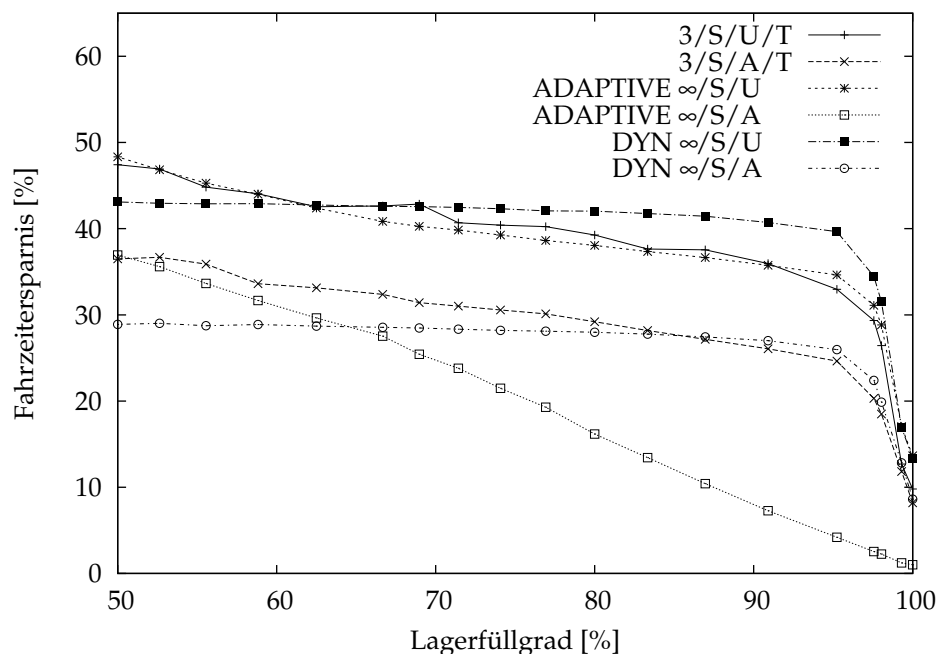


Abbildung 5.23.: 1000 Artikel (60/20) – Leistungsunterschiede durch artikelbezogene oder lagereinheitsbezogene Verweildauerbestimmung

che Abhängigkeit der KFZ-Strategie vom Lagerfüllgrad. Während KFZ bei geringeren Lagerfüllgraden Leistungsvorteile gegenüber GV dadurch erzielt, dass die fahrzeitungünstigsten Lagerbereiche ungenutzt bleiben, ergibt sich bei hohen Füllgraden kein eindeutiges Bild. In den genannten Abbildungen fallen deutliche Unterschiede zwischen KFZ und GV auf. Dabei sind die Leistungsverbesserungen, welche KFZ bei geringeren Lagerfüllgraden erzielt, spontan nachvollziehbar. Unter KFZ werden immer nur die je nach aktueller Lagerbelegung fahrzeitgünstigsten Lagerorte belegt. Bei geringen Lagerfüllgraden bleiben die ungünstigen Lagerorte permanent ungenutzt. Unter GV werden dagegen nach wie vor alle zur Verfügung stehenden Lagerorte verwendet, was die Unabhängigkeit der Fahrzeiterparnis vom Lagerfüllgrad erklärt. Neben dieser Abhängigkeit von Lagerfüllgrad besteht zusätzlich eine Abhängigkeit von der Ungleichverteilung der Durchsätze im Sortiment. Dabei schneidet KFZ um so schlechter ab, je stärker die Ungleichverteilung ausfällt. Einbußen von bis zu 30% gegenüber GV sind möglich (s. Abb. 5.21).

Die Erklärung für die Leistungseinbußen von KFZ gegenüber GV bei hohen Lagerfüllgraden und bei starker Ungleichverteilung im Sortiment ist weniger offensichtlich. Die Ursache liegt in der Ansammlung von Lagereinheiten mit hoher Verweildauer in den fahrzeitgünstigeren Lagerbereichen. Dies kommt wie folgt zustande: Bei KFZ werden fahrzeitgünstigere Lagerorte tendenziell mit etwas größerer Wahrscheinlichkeit ausgewählt als ungünstigere. Bei der Belegung dieser Plätze wird nicht nach Verweildauer der Lagereinheiten differenziert. Lagereinheiten mit hoher Verweildauer kommen ebenfalls auch auf den fahrzeitgünstigeren Lagerorten zu liegen. Diese Lagerorte stehen dann für längere Zeit nicht mehr für Lageroperationen zur Verfügung. Deshalb verlagert sich der Schwerpunkt der Lageroperationen in Richtung der fahrzeitungünstigen Lagerorte. Dieser Effekt ist um so größer, je ungleicher das Sortiment verteilt ist. Bei den durchsatzstärksten Artikeln werden große Lose schnell verbraucht. In die bis zur Nachlieferung entstehenden Freiräume werden komplette Lose durchsatzschwacher Artikel auf die darin fahrzeitgünstigsten Plätze eingelagert, wo sie entsprechend lange verweilen. Bei hohem Lagerfüllgraden kann dieser nachteilige Effekt nicht durch die unterbleibende Nutzung der fahrzeitungünstigsten Lagerorte kompensiert werden. Ohne losweise Ein- bzw. Auslagerungen ist dieser Effekt nicht zu beobachten.

5.5.4. Dynamische Sortimente

5.5.4.1. Konfiguration

Thorsten BRANDES hat in seiner Arbeit „Betriebsstrategien für Materialflusssysteme unter besonderer Berücksichtigung automatisierter Lager“ umfangreiche Untersuchungen von Lagerstrategien, u. a. auch von Schnellläuferstrategien, durchgeführt [Bra97]. In dieser Arbeit entwirft er ein Einsatzszenario, welches ausdrücklich auch dynamische Effekte innerhalb des Sortimentes einbezieht. Als Durchsatzverteilung wählt er die von LINN und WYSK vorgeschlagene Form [LW84]

$$D(i) = D_{ges} \cdot si^{(s-1)} \cdot n^{-s} \quad (5.40)$$

mit $s = 0.02$ und $n = 100$ Artikeln. Die Durchsätze werden tagesbezogen mit den Lastfaktoren laut Tabelle 5.3 überlagert.

Wochentag	Lastfaktor
Mo	120%
Di	80%
Mi	100%
Do	110%
Fr	90%

Tabelle 5.3.: Wochentagsabhängige Lastfaktoren nach [Bra97]

Der Gesamtdurchsatz entspricht auf einen Gang bezogen $\lambda = 25 \text{ LE}/h$. Die Zwischenankunftszeiten der Lagereinheiten sind exponentialverteilt und ergeben sich aus

$$t_a = -\ln(ZV) \cdot \frac{1}{\lambda} \quad (5.41)$$

Dabei soll laut [Bra97] ZV eine im Intervall $(0;1]$ normalverteilte Zufallsvariable sein. Aus dem Kontext wird ersichtlich, dass eigentlich eine gleichverteilte Zufallsvariable gemeint sein muss. Diese Zwischenankunftszeitverteilung gilt für den gesamten Strom der Lagereinheiten. Der Artikelindex wird dann nach Maßgabe der Artikelhäufigkeit zufällig gewählt und einer Lagereinheit zugeordnet. Diese Verfahrensweise blendet die für die Leistungsfähigkeit von Schnellläuferstrategien wichtige losweise Disposition aus (s. auch Abschnitt 5.4.1 auf Seite 68). Im Vergleichsmodell wurde stattdessen die Zwischenankunftszeit *artikelbezogen* exponentialverteilt so gewählt, dass in Summe die gleichen Durchsätze entstehen.

Weiterhin wird abweichend von BRANDES

- statt 4 Gängen nur 1 Gang simuliert,
- die Vorzone nicht abgebildet,
- und die zu lagernde Menge jedes Artikels nach dem Grundmodell der optimalen Bestellmenge bestimmt. Dabei werden die Kostenparameter so gewählt, dass sich der Lagerfüllgrad bei den von Brandes vorgegebenen 80% und einer mittleren Verweildauer bei 38.5h einstellen. Weiterhin werden
- die schwankenden Durchsätze unter Einbeziehung der Änderungsrate der Durchsätze korrekt in Zwischenankunftszeiten umgesetzt und
- 24h-Tage statt 7h-Tage simuliert.

BRANDES geht bei der Zonenbildung von vorgegebenen Verweildauergrenzen aus („Strategieparameter“). Alle Lagereinheiten, deren Verweildauer die Verweildauerobergrenze einer bestimmten Zone überschreitet, werden in der nächsten Zone gelagert. Die Bestimmung der Zonengrößen und damit die Zoneneinteilung erfolgt anhand der Verweildauern der Anfangsbelegung im Lager. Bei der Bewertung der Ergebnisse von Brandes ist zu beachten, dass durch

5. Dynamische Zonierung

Strategie	Auslastung des Regalbediengerätes [%]	mittlere Auftragswarte- schlange ¹³ [LE]
gleichverteilt	93.2	125.1
kürzeste Fahrzeit	89.9	143.4
3 Zonen artikelbasiert wöchentliche Aktualisierung	85.1	89.3
3 Zonen artikelbasiert	84.7	79.2
3 Zonen lagereinheitsbasiert wöchentliche Aktualisierung	80.2	77.2
adaptiv	80.2	75.4
3 Zonen lagereinheitsbasiert	80.0	76.8
dynamisch zониert	79.1	69.4

Tabelle 5.4.: Strategien im dynamischen Umfeld

die willkürliche Wahl der Phasenverschiebung nach Gleichung (5.43) Artikel mit ähnlich hohen Durchsätzen auch mit nahezu gleicher Phasenverschiebung in einen Simulationslauf starten. Der Durchsatz eines Artikels fluktuiert laut Gleichung (5.42).

$$D(i)^{season} = D(i) \cdot (1 + \beta \sin(\pi\omega t + \theta(i))) \quad (5.42)$$

$$\theta(i) = \frac{100 \cdot i}{2} \quad (5.43)$$

Der Reziprokwert $\frac{1}{T}$ der Periode T der Sinusfunktion wird als ω definiert. Die 3 durchsatzstärksten Artikel, welche zusammen $\frac{1}{3}$ des Durchsatzes ausmachen, weisen eine Phasenverschiebung von weniger als $\frac{1}{8}$ Periode auf. Dadurch kommt es über mehrere Tage hinweg zu einer Überlastung des Systems. Diese Situation ist unrealistisch, weil sie in der Praxis durch entsprechend angepasste Disposition vermieden würde. Für die Simulation des Sortimentes von BRANDES wurde diesbezüglich deshalb die gleiche Konfiguration wie in den anderen Simulationsexperimenten verwendet (s. Abschnitt 5.5.2 auf Seite 82).

5.5.4.2. Ergebnisse

Auch bei fluktuierenden Durchsätzen liefert die Dynamische Zonierung die besten Resultate. Dabei ist der Vorsprung, den die Strategie gegenüber einer 3/S/U/T-Strategie herausarbeiten kann, relativ gering (s. Tab. 5.4). Verbesserungen ergeben sich vor allem bei der mittleren Auftragswarteschlangenlänge und damit bei der Auftragsdurchlaufzeit. Bei gleicher Auslastung lässt das auf eine geringere Varianz der Spielzeiten schließen. Auffällig ist, dass die Reorganisation der Lagerzonen nicht in der Lage ist, die mittelfristigen Schwankungen in einen Optimierungsgewinn im Vergleich zu nicht reorganisierten Zonen umzusetzen. Dabei ist es

gleich, ob die Zonen täglich, wöchentlich oder monatlich angepasst werden¹⁴. Diese Aussage deckt sich mit den Beobachtungen von LINN und WYSK [LW84], nach deren Aussage die Neubestimmung der Zonengrenzen nur in manchen Konstellationen bessere Resultate bringt. Nichtsdestotrotz bleibt Reorganisation bei herkömmlichen Strategien zur Erfassung langfristiger Effekte weiterhin notwendig.

5.6. Zusammenfassung

Die dargestellten Einsparungen von bis zu 60% der kumulierten Einzelspielfahrzeit zeichnen ein sehr positives Bild. Die praktisch erzielbaren Leistungssteigerungen durch Schnellläuferstrategien in gassengebundenen Lagersystemen werden weit geringer ausfallen. Dafür ist ganze Reihe von Gründen verantwortlich, wovon ein Teil auf alle Schnellläuferstrategien gleichermaßen ungünstig wirkt: Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge beeinträchtigen besonders in den fahrzeitgünstigsten Lagerbereichen die Fahrzeit. Weiterhin überwiegen gerade in diesen Bereichen die fixen Spielzeitanteile oft die variablen. Die fixen Spielzeitanteile bilden eine untere Schranke, welche sich auch von der ausgefeiltesten Lagerstrategie nicht beeinflussen lässt.

Andere Prozesse dämpfen die Effekte, welche sich mit der lagereinheitsbasierten Betrachtung erzielen lassen. So lagert man innerhalb einer Lagereinheit sinnvollerweise mehrere Articleinheiten. Bei einer Anzahl Artikeln führt das dazu, dass die Bestellmenge nur noch aus einer Lagereinheit besteht, was die lagereinheitsbasierte Betrachtung mit der artikelbasierten identisch macht. Eine geringe Anzahl bestellter Lagereinheiten¹⁵ führt zusammen mit etwaigen Sicherheitsbeständen auch zur Egalisierung von Verweildauerunterschieden, insbesondere bei Langsamdrehern. Solche Effekte sind noch nicht quantifiziert.

Dennoch bietet die Dynamische Zonierung gegenüber herkömmlichen Schnellläuferstrategien Leistungsvorteile. Diese Leistungsvorteile entstehen durch die konsequente Umsetzung zweier Grundkonzepte, der lagereinheitsbasierten Verweildauerbetrachtung und der kontinuierlichen, klassenlosen Abbildung. Jedes dieser Konzepte für sich erlaubt bereits eine Steigerung der Leistungsfähigkeit von Schnellläuferstrategien. Doch erst wenn diese Konzepte in der Dynamischen Zonierung vereinigt werden, entfaltet sich ihr volles Potential.

Der eigentliche Hauptvorteil der Dynamischen Zonierung liegt an anderer Stelle: Sie lässt sich im Vergleich zu herkömmlichen Schnellläuferstrategien einfacher umsetzen und betreiben. Planung, Dimensionierung und Anpassung von Anzahl, Form, Lage und Größe der Zonen bzw. Verweildauergrenzen entfallen. Dies gilt auch bei untypischen Lagerformen, Formfaktoren und Lagen der Übergabe- und Übernahmepunkte. Reorganisation entfällt bzw. ist implizit im Algorithmus enthalten.

Die Dynamische Zonierung leistet einen Beitrag, den Aufwand und die Unwägbarkeiten beim Einsatz von Schnellläuferstrategien zu vermindern. Sie ist in der Lage, vorhandene Optimierungspotentiale besser zu erschließen als herkömmliche Schnellläuferstrategien. Dabei ist

¹⁴Bei den 3/S-Strategien wurden Zonenaktualisierungsintervalle von 1, 7 und 30 Tagen simuliert, was zu identischen Ergebnissen geführt hat.

¹⁵„Bestellte Lagereinheiten“ entstehen aus eingelagerten bestellten Articleinheiten.

5. Dynamische Zonierung

das Grundprinzip der Dynamischen Zonierung so flexibel, dass sie transparent verschiedene Lagerstandorte oder -bauformen einbeziehen kann, um den Gesamtdurchsatz zu optimieren.

6. Verweildauerprognose

6.1. Einleitung

Bisher wurde in den Ausführungen von gegebenen Verweildauern ausgegangen. Bei der Anwendung von Schnellläuferstrategien stehen diese jedoch nicht ohne weiteres zur Verfügung. Eine Verweildauer stellt sich erst durch die Auslagerung der jeweiligen Lagereinheit ein und damit jedenfalls nach dem Zeitpunkt, zu dem diese für eine Lagerortbestimmung benötigt wird. Verweildauern müssen deshalb prognostiziert werden.

Die Verweildauerprognose oder verwandte Maßnahmen wie Umschlagsraten- oder Durchsatzprognose werden im Umfeld von Lagerstrategien selten erwähnt. Die axiomatische Einheit von bekanntem Verbrauch, Losgrößenoptimierung und Berechnung der mittleren Verweildauer bzw. Umschlagsrate zieht sich durch die meisten Veröffentlichungen. Die Verweildauerprognose wird durch diese Herangehensweise auf eine Bedarfsprognose reduziert. Allein dann, wenn konkrete Implementierungen von Modellen beschrieben werden, wird die Verweildauerprognose zum Thema. Beispielsweise lässt BRANDES anklingen, dass eine Bedarfsprognose nebst Berechnung praktische Probleme des Lagerbetriebes unberücksichtigt lässt [Bra97, S. 103ff.].

Eine lagereinheitsbasierte Verweildauerprognose wird von der Wissenschaft nicht behandelt. Dies verwundert nicht, da auch die Sinnhaftigkeit der lagereinheitsbasierten Betrachtung bisher weitgehend unerkannt blieb. Damit bleiben in diesem Kapitel zwei Themen zu bearbeiten: Wie kann statt des üblichen Artikelbezuges ein Lagereinheitsbezug der Verweildauerbestimmung hergestellt werden und wie kann ein solches Verfahren praktisch umgesetzt werden?

Allein schon wegen des dafür erforderlichen Umfangs kann in diesem Kapitel keine umfassende oder gar abschließende Behandlung von Prognoseverfahren erfolgen. Stattdessen wird im ersten Teil des Kapitels gezeigt, dass eine Untersuchung und Neubewertung einzelner Prognoseverfahren für die lagereinheitsbasierte Betrachtung nicht notwendig ist. Mehr noch, die Berechnung lagereinheitsbezogener Verweildauern vereinfacht für einen Teil des Lagersortimentes die Anwendung von Schnellläuferstrategien. Dies gilt um so mehr, bezieht man Anforderungen aus dem praktischen Lagerbetrieb in die Betrachtung ein. Der zweite Teil des Kapitels befasst sich mit diesen Anforderungen. Abschließend werden Simulationsergebnisse aus Läufen mit gezielt verfälschter Prognose dargestellt.

6.2. Bedarfsprognose statt Verweildauerprognose

Bei der Anwendung jeglicher Schnellläuferstrategie muss für jede Lagereinheit die Verweildauer im Lager *vor* der Einlagerung zur Verfügung stehen, obwohl der Auslagerungszeitpunkt

6. Verweildauerprognose

meist noch unbekannt ist. Die *Prognose* von Verweildauern ist deshalb unerlässlich. Dabei handelt es sich nicht um eine zusätzliche Anforderung durch den Lagerbetrieb. Stattdessen ist die Prognose der mittleren Verweildauer der Lagereinheiten eines Artikels ein Nebenprodukt anderer, ohnehin notwendiger Prognosen bzw. Planungen und Festlegungen. Erstens liefert die Bedarfsplanung Informationen zu Bestell- bzw. Produktionsmengen und -zeitpunkten. Zweitens ist die verfügbare Lagerkapazität als Restriktion der Beschaffungs- und Produktionsplanung ständig präsent, weshalb für jeden Artikel auch Lagermengen bestimmt werden müssen. Über den Bedarf pro Zeiteinheit und die mittlere gelagerte Menge lässt sich die mittlere Verweildauer der Lagereinheiten eines Artikels berechnen (s. nächster Abschnitt).

Die Prognose des Bedarfs erfolgt durch Analyse der entsprechenden Zeitreihen. Zeitreihen liegen dann vor, wenn eine Variable „zu äquidistanten Zeitpunkten beobachtet werden kann“ [Bur80, S. 7]. Aus dem Bedarf der Periode T_n oder vorhergehender Perioden wird auf den Bedarf der Periode T_{n+1} geschlossen. Kein mit Beschaffungs-, Produktions- oder Absatzplanung befasstes Werk kommt ohne die Darstellung grundlegender Verfahren aus. Stellvertretend seien die Methode des exponentiellen Glättens oder die Regressionsanalyse genannt. Die Eignung von auf Zeitreihen basierenden Prognoseverfahren ist auch für den Einsatz in Lagerplanung und -betrieb umfassend und vergleichend untersucht [Mer94]. Auf diese Weise bestimmte Bedarfe dienen als Grundlage der Beschaffungs- bzw. Produktionsplanung, im Zuge derer auch Losgrößen bestimmt werden.

Durch dieses Vorgehen werden allerdings *keine* Verweildauern prognostiziert. Stattdessen wird im Nachhinein der Mittelwert der erwarteten Verweildauern berechnet (s. Gleichung 6.1). Bei Verweildauern handelt es sich um die zeitliche Differenz der Zeitpunkte zweier zusammengehöriger, zufällig auf der Zeitachse liegender Ereignisse. Verweildauern bilden deshalb keine Zeitreihe¹.

Ohnehin fehlt der lagereinheitsbezogenen Prognose von Verweildauern bei ausschließlicher Konzentration auf den Bedarf $D(i)$ und die mittlere gelagerte Menge $m(i)$ die Grundlage. Eine verfeinerte Prognose müsste entweder

- bereits auf Teilergebnissen der Prognose von $D(i)$ und $m(i)$ aufsetzen, z. B. auf $Q(i)$, oder
- einen grundsätzlich anderen Ansatz verfolgen.

Jedenfalls scheint zusätzlicher Aufwand zur lagereinheitsbasierten Betrachtung erforderlich, welcher aber in Hinblick auf die in den vorhergegangenen Kapiteln dargestellten Ergebnisse gerechtfertigt sein könnte.

In einigen Einzelfällen ist die lagereinheitsbasierte Betrachtung ganz offensichtlich weniger aufwendig, als die artikelbasierte. Dies ist immer dann der Fall, wenn die Verweildauer einzelner Lagereinheiten *a priori* bekannt ist, also keinerlei Prognose oder Berechnung erfolgen muss. Solche Situationen treten am Rande von Just-In-Time-Produktionsprozessen oder allgemein bei sehr detaillierter Produktionsplanung auf. Für zu speicherndes Frühgepäck in

¹Genau genommen manifestiert sich auch der Bedarf in Form „zufällig auf der Zeitachse liegender Ereignisse“. Diese werden jedoch periodisiert, was die Grundlage für die Zeitreihenanalyse schafft. STADTLER und KILGER verwenden den Begriff „time-buckets“ [SK08, S. 136].

Flughäfen ist der Auslagerzeitpunkt ebenfalls mit hoher Sicherheit bekannt. Die artikelbasierte Betrachtung scheitert hier schon mangels „Artikeln“ und auch die Bestände sind nicht dispositiv.

Wenn bereits lagereinheitsbasierte Verweildauern vorliegen, ist der Versuch artikelbasierte mittlere Verweildauern für Schnellläuferstrategien zu erlangen sträflich, weil dieser mit Mehraufwand und schlechterem Strategiegewinn einher geht.

Im Folgenden wird untersucht, ob und wie lagereinheitsbezogene Verweildauern bestimmt werden können.

6.3. Verweildauerberechnung

6.3.1. Staulager

Die mittlere Verweildauer $t_{VV_i}^*$ der Lagereinheiten eines Artikels i ergibt sich bei artikelbezogener Betrachtung als Quotient der mittleren gelagerten Menge $m(i)$ und des prognostizierten Bedarfs $D(i)$ nach diesem Artikel.

$$t_{VV_i}^* = \frac{m(i)}{D(i)} \quad (6.1)$$

Die Prognose der Abgangsrate, also die Prognose von $D(i)$, ist immer integraler Bestandteil der Warenwirtschaft, unabhängig davon ob bzw. welche Lagerstrategien eingesetzt werden.

Gleiches gilt für die mittlere gelagerte Menge $m(i)$, welche sich aus der Produktions- bzw. Bestellmengenplanung sowie aus dem ebenfalls zu planenden Sicherheitsbestand $b_s(i)$ ergibt. Bei unendlicher Produktionsgeschwindigkeit bzw. Zugangsrate, d. h. bei Lieferung und Einlagerung ganzer Lose², wird $m(i)$ nach

$$m(i) = \frac{Q(i)}{2} + b_s(i) \quad (6.2)$$

berechnet. So ist $t_{VV_i}^*$ für alle Lagereinheiten eines Loses gleich, und bei der Reihenfolge der Auslagerung braucht nicht differenziert zu werden.

Die Berechnung von Verweildauern für einzelne Lagereinheiten erfordert eine detailliertere Betrachtung von Losen als die artikelbasierte Berechnung. Maßgeblich ist die Unterscheidung zwischen Stau- und Zerreißlagern. Vom einem Staulager spricht man, wenn die Zugangsrate eines Artikels die Abgangsrate überschreitet. Andernfalls handelt es sich um ein Zerreißlager [BBGR92, S. 250ff.]. Im Staulagerfall muss der Zugang von Lagereinheiten unterbrochen werden, während der Abgang kontinuierlich erfolgt. Dieser Fall ist für Absatzlager typisch und unabhängig davon, ob die Zugänge aus der Produktion oder Beschaffung erfolgen.

Lagereinheitsbasierte Verweildauern verlangen die Berechnung von $Q(i)$ Verweildauern für ebenso viele Lagereinheiten eines Loses sowie deren dauerhafte Zuordnung. Diese Berech-

²Die Einlagerung aller Lagereinheiten ganzer Lose wird aus materialflusstechnischen Gründen nicht tatsächlich gleichzeitig erfolgen. Die entstehenden Zeitdifferenzen sind aber im Vergleich zur Gesamtverweildauer vernachlässigbar.

6. Verweildauerprognose

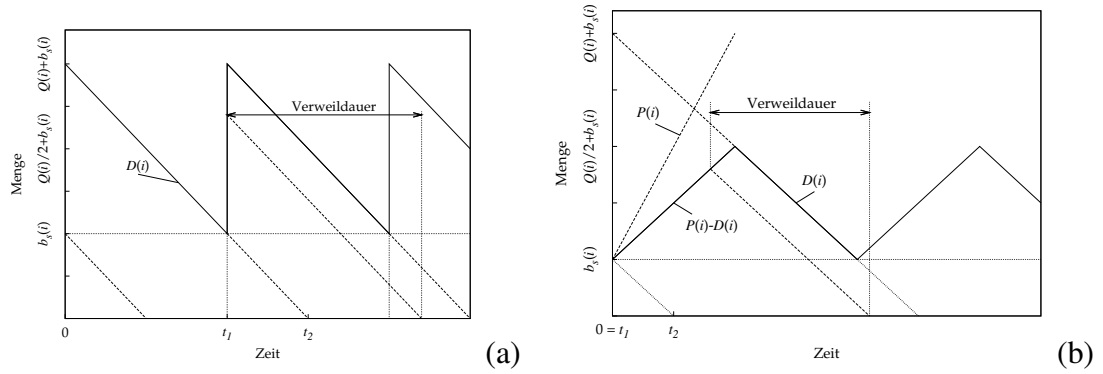


Abbildung 6.1.: Bestandsverlauf und Verweildauerbeispiel (a) bei unendlicher Zugangsrate, (b) offener Fertigung

nung und Zuordnung lässt sich am leichtesten mit identischer Reihenfolge der Ein- und Auslagerung herstellen. Dass diese Regel – nämlich FIFO – für den Lagerbetrieb ohnehin sinnvoll ist, um übermäßige Alterung von Lagereinheiten zu vermeiden, kann als glücklicher Umstand bezeichnet werden.

Für die Festlegung der Verweildauern wird die Beschaffungsperiode $\frac{Q(i)}{D(i)}$ in $Q(i)$ gleich lange Intervalle mit der Dauer $\frac{1}{D(i)}$ zerlegt. Die Verweildauer $t_{VW_i}^*(j)$ der j -ten Lagereinheit des Loses beträgt dann nach den Gleichungen (6.1) und (6.2)

$$t_{VW_i}^*(j) = \frac{j + b_s(i)}{D(i)}. \quad (6.3)$$

Beim Term $\frac{b_s(i)}{D(i)}$ handelt es sich um einen konstanten Zeitanteil der jeder Lagereinheit aufgeschlagen wird. Er entspricht der Dauer des Verbrauchs des Sicherheitsbestandes ($t_2 - t_1$, s. Abb. 6.1). Der Verbrauch der Lagereinheiten des neuen Loses setzt erst dann ein, wenn alle Lagereinheiten, welche sich bei Eintreffen des Loses bereits im Lager befanden, verbraucht sind.

Bei nicht-unendlicher Zugangsrate $P(i)$ muss diese in die Berechnung der Verweildauern einbezogen werden. Diese Zugangsrate bezieht sich ausschließlich auf die Produktionsphasen. Langfristig sind Zu- und Abgangsrate gleich. Bei nicht-unendlichen Raten wird zwischen offener und geschlossener Fertigung unterschieden. Offene Fertigung erlaubt Abgänge von Lagereinheiten noch im Aufbau befindlicher Lose. Bei geschlossener Fertigung beginnt der Verbrauch eines Loses erst dann, wenn es vollständig war. Als Grund für diese Handhabung werden z. B. die gemeinsame Prägung eines Loses oder transportlogistische Gründe angeführt [SK08]. Diese Betrachtung ist zwar aus Sicht der Fertigung und Losgrößenberechnung richtig, aus Sicht der Verweildauerbestimmung im Lager wird der Fall geschlossener Fertigung meist als Eintreffen eines kompletten Loses und damit unendliche Zugangsrate erscheinen.

Die Verweildauer der j -ten Lagereinheit bei offener Fertigung beträgt

$$t_{VW_i}^*(j) = j \cdot \left| \frac{1}{D(i)} - \frac{1}{P(i)} \right| + \frac{b_s(i)}{D(i)}. \quad (6.4)$$

Bei geschlossener Fertigung lautet sie

$$t_{VWi}^*(j) = j \cdot \left(\frac{1}{D(i)} + \frac{1}{P(i)} \right) + \frac{b_s(i)}{D(i)}. \quad (6.5)$$

Die Lösungen (6.3), (6.4) und (6.5) haben eine überaus nützliche Eigenschaft gemeinsam. Sie sind unabhängig von der Losgröße $Q(i)$ und damit auch von $m(i)$. Die Verweildauer von Lagereinheiten solcher dispositiven Artikel wird deshalb allein durch

1. die Abgangsrate $D(i)$,
2. die Zugangsrate $P(i)$,
3. die ordinale Position j der Lagereinheit innerhalb des Loses sowie
4. den Sicherheitsbestand $b_s(i)$.

bestimmt. Um für jede einzelne Lagereinheit eine Verweildauer zu bestimmen, muss man diese, vereinfacht gesagt, *zählen*. Dadurch wird jeder einzelnen Lagereinheit der Index j zugeordnet. Auf Möglichkeiten festzustellen, wann mit dieser Zählung wieder neu begonnen werden muss, wird in den folgenden Abschnitten eingegangen. Durch die Zählung erübrigt sich gleichzeitig jegliche andere Mengenbetrachtung zwecks Verweildauerbestimmung.

Kenntnis und Verwendung der mittleren gelagerten Menge und der mittleren Verweildauer eines Artikels bringen Schnellläuferstrategien in reinen Absatzlagern deshalb keinen Vorteil. Schon die Konsolidierung der Planungsdaten zwecks Berechnung dieser Größen für die Verwendung in Schnellläuferstrategien stellt einen Zusatzaufwand dar, welcher letztenendes noch zu schlechterem Strategiegewinn führt. Angesichts dieser Tatsache muss die Verwendung der mittleren Verweildauer der Artikel für dispositive Bestände mit kontinuierlichem Verbrauch grundsätzlich abgelehnt werden.

6.3.2. Zerreißlager

Der Zerreißlagerfall tritt bei der Zwischenlagerung in Produktionsprozessen auf. Er unterscheidet sich hinsichtlich der Verweildauer der Lagereinheiten deutlich vom Staulagerfall. Während beim Staulager die erste eintreffende Lagereinheit die kürzeste Verweildauer aufweist und die letzte Lagereinheit des Loses die längste, ist beim Zerreißlager das Gegenteil der Fall. Bei unterbrechungsfreiem Lagereinheitszugang lassen sich Verweildauern für jede einzelne Lagereinheit berechnen, indem auf der rechten Seite der Gleichungen (6.3), (6.4) und (6.5) j durch $(Q(i) - j)$ ersetzt wird und wenn $b_s(i) = 0$ gilt. Damit ist Unabhängigkeit von der Losgröße nicht mehr gegeben. Unter Einbeziehung von Sicherheitsbeständen hängt die Verweildauer der einzelnen Lagereinheit auch vom Quotient aus Sicherheitsbestand und Losgröße $q(i) = b_s(i)/Q(i)$ ab. Die Zugehörigkeit zu einem Los stellt sich nur *ex post* ein. Definiert man die zwischen der Auslagerung zweier Lose eingelagerten Lagereinheiten als Einlagerlos, können Verweildauern berechnet werden. Dazu müssen der ganzzahlige Anteil

6. Verweildauerprognose

$\text{floor}[q(i)]$ und der gebrochene Anteil $\text{frac}[q(i)]$ getrennt behandelt werden. Die Verweildauer einer Lagereinheit bei Abgang ganzer Lose lautet

$$t_{VWi}^*(j) = \text{floor}\left(\frac{b_s(i)}{Q(i)}\right) \cdot \frac{Q(i)}{P(i)} + \begin{cases} \frac{Q(i)-j}{P(i)} & \text{für } 1 - \frac{j}{Q(i)} > \text{frac}\left(\frac{b_s(i)}{Q(i)}\right) \\ \frac{2Q(i)-j}{P(i)} & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.6)$$

Lagereinheitsauswahl nach LIFO vermiede diese umständliche Berechnung auf Kosten eines dauerhaft alternden Sicherheitsbestandes.

Vergegenwärtigt man sich die Umstände, unter denen Zerreißlager auftreten, ergibt sich für die Verweildauerprognose oder -berechnung ein noch ungünstigeres Bild. Zerreißlagerartikel werden Prozessen zugeliefert, welche nicht kontinuierlich betrieben werden (können). Die Zugangsrate des Zwischenprodukts Zerreißlagerartikel selbst wird häufig nicht zur Abgangsrate des Endproduktes passen. Daraus resultiert, dass weder Lagerzugang noch Lagerabgang kontinuierlich erfolgen. Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe weisen eine ähnliche Charakteristik auf. In diesen Fällen ist sowohl die lagereinheitsbasierte Verweildauerberechnung als auch die Berechnung von $m(i)$, also die artikelbezogene Verweildauerberechnung, problematisch. Abschnitt 6.4.4 nennt Ansätze, wie in solchen Fällen verfahren werden kann.

6.4. Praxiseinsatz

6.4.1. Steuerungsebenen

Die Verweildauerprognose für Lagereinheiten bei Einsatz von Schnellläuferstrategien wurde bisher implizit oder explizit auf die Bedarfsprognose für einen Artikel reduziert. Dabei unterscheiden sich die Anforderungen an die Bedarfsprognose in einigen Punkten signifikant von den Anforderungen an eine Verweildauerprognose. Die im folgenden Abschnitt diskutierten Anforderungen an die Verweildauerprognose lassen sich nur veranschaulichen, wenn man die Art der Realisierung der Steuerung des Materialfluss-Systems im Lager einbezieht.

Dazu ist ein Exkurs in die Steuerungsebenen eines Materialfluss-Systems und in die softwaretechnische Umsetzung der Steuerung notwendig. Man unterscheidet in Steuerungssystemen [Gro84, Luc86]:

- administrative Ebene,
- dispositive Ebene und
- operative Ebene.

Bei Lagersystemen werden in der höchsten Ebene, der administrativen Ebene, Entscheidungen über Lagerhaltigkeit von Artikeln, Lager(-zonen-)kapazitäten und -zuordnungen sowie Artikelmengeentscheidungen getroffen. Diese Ebene ist die Domäne der Warenwirtschaftssysteme (WWS), zu denen hier auch die Produktionsplanungssysteme gezählt werden sollen. Auf der untersten Ebene, der operativen Ebene, geht es um die physische Steuerung der einzelnen Transportvorgänge, welche durch SPS und eventuell einen Materialflussleitreechner realisiert

wird. Lagereinheiten werden von Förderer zu Förderer durch die Vorzone auf das Regalbediengerät übergeben und von diesem auf den vorgegebenen Lagerplatz transportiert.

Die dazwischenliegende dispositive Ebene sorgt für die Umsetzung der Lagerstrategien und enthält die aktuelle Zuordnung des Lagerbestandes zu konkreten Lagerorten, den Lagerspiegeln. Diese dispositive Ebene wird als Lagerverwaltungssystem (LVS) bezeichnet. Ebenfalls Aufgabe des LVS ist die Verwaltung der Ladungsträgerkapazitäten, welche für die Umrechnung von Artikeleinheiten in Lagereinheiten benötigt wird.

Die Zuordnung der Funktionalität zu konkreten Hard- und Softwarekomponenten kann unterschiedlich sein. Im Extremfall ist die Funktionalität des Lagerverwaltungssystems entweder in das Warenwirtschaftssystem oder in den Materialflussleitrechner integriert. Typischer ist jedoch eine Aufgabenteilung entsprechend der genannten Steuerungsebenen, wobei Software verschiedener Lieferanten zum Einsatz kommen kann [BT02]. Das Warenwirtschaftssystem auf der administrativen Ebene ist sinnvollerweise elementarer Bestandteil des unternehmensübergreifenden ERP-Systems³. Die Steuerung auf der untersten Ebene wird i. d. R. durch den Lieferanten der Lager- und Fördertechnik gestellt. Lagerverwaltungssysteme für die dispositive Ebene werden sowohl von den Anbietern der Systeme der benachbarten Steuerungsebenen als auch von zahlreichen spezialisierten Softwareunternehmen angeboten. In den folgenden Ausführungen wird von einer Dreiteilung ausgegangen.

In jedem Fall müssen Daten aus dem Warenwirtschaftssystem an das Lagerverwaltungssystem und umgekehrt übergeben werden. Im Minimalfall handelt es sich dabei um die gemeinsame Identifikation von Artikeln. Darüber hinaus können auch Prognosedaten aus dem Warenwirtschaftssystem dem Lagerverwaltungssystem zugänglich gemacht werden. Der Umfang, in dem Schnellläuferstrategien auf einen Datenaustausch zwischen den Ebenen angewiesen sind, ist ein Faktor für die Kosten der Implementierung von Schnellläuferstrategien. Dies gilt um so mehr, wenn die Implementierung nachträglich erfolgen soll. In der Reihung von vollständig WWS-gebundener zu LVS-autonomer sind folgende Umsetzungen möglich:

WWS-gebunden Die Abbildung der Verweildauer auf eine Zone kann bereits im WWS erfolgen. Die gewählte Zone wird als Element der Enumeration aller Zonen direkt diskret übergeben.

Eine lagereinheitsbasierte Verweildauerberechnung ist nach Umrechnung der Mengen aus Artikeleinheiten in Lagereinheiten möglich, da Zugangsrate, Abgangsrate und Sicherheitsbestand ohnehin Gegenstand des WWS sind. Die Indizierung der Lagereinheiten ist durch die Zugangsmeldungen aus dem LVS ebenfalls möglich. Das WWS kann besonders sicher erkennen, wann die Lagereinheitszählung zurückgesetzt werden muss, da ein direkter Zusammenhang mit bestellten bzw. produzierten Losen zu Lagereinheiten hergestellt werden kann.

Diese Form der Zonenfestlegung erfordert zusätzliche Abstimmung zwischen WWS und LVS hinsichtlich der Zonenkapazitäten. Dazu müssen diese vordefiniert und laufend aktualisiert werden, wodurch sich der scheinbare Vorteil einer einfachen Zuordnung und Schnittstelle in Gegenteil verkehrt. Praktisch ist diese Form der Implementierung nur bei rudimentärer LVS-Funktionalität nicht aber bei Umsetzung von Schnellläuferstrategien angemessen.

³engl. Enterprise Resource Planning,

6. Verweildauerprognose

WWS-LVS Die Verweildauer jeder Lagereinheit wird vom WWS an das LVS direkt übergeben, wobei wiederum von Articleinheiten auf Lagereinheiten umgerechnet werden muss. Die Abbildung auf eine Zone erfolgt erst im LVS. Hierbei wären bei klassischer Zonenbildung Informationen zu Grenzverweildauern und Zonenkapazitäten durch das WWS für Parametrierung des LVS bereitzustellen, wobei die gleichen Nachteile wie bei der WWS-gebundenen Variante entstünden.

Alternativ kann deshalb das LVS Zonengrenzen und Zonenkapazitäten aus den Daten des Bestandes selbst bestimmen, was auch den Einsatz der Dynamischen Zonierung ermöglicht.

Bei sehr detaillierter Produktionsplanung oder aus dem Supply-Chain-Management vorhandenen Detaildaten können Verweildauer einzelner Lagereinheiten präzise berechnet werden, was dann für den Einsatz dieser Variante spricht.

LVS-WWS Im LVS wird pro Artikel ein Stammdatensatz als Tupel $\{D(i), P(i), b_s(i)\}$ geführt, welcher durch das WWS bei Bedarf initialisiert bzw. aktualisiert wird. Nach Aktualisierung der Daten kann sich eine Aktualisierung der prognostizierten Verweildauern der Lagereinheiten im Lager anschließen. Dadurch bleibt auch die Verweildauerverteilung der Lagereinheiten im Lager aktuell.

Die Indizierung der Lagereinheiten sowie die Berechnung der Verweildauern erfolgt dabei innerhalb des LVS. Bei Beginn eines neuen Loses kann für das Rücksetzen der Indizierung ein Signal des WWS genutzt werden. Kann nicht auf ein solches Signal zurückgegriffen werden muss der Beginn neuer Lose auf Basis der Dauer der Unterbrechung der Einlagerung erkannt werden.

Kann das WWS keine aussagekräftigen Daten zur Verfügung stellen, kann für diesen Teil des Lagersortimentes auf die LVS-autonome Verfahrensweise zurückgegriffen werden.

LVS-autonom Dem LVS wird lediglich eine Artikelkennung zugänglich gemacht. Sämtliche Prognoseverfahren sind zusammen mit den Lagerstrategien in das LVS integriert. In diesem Sonderfall übernimmt oder repliziert das LVS einzelne Aufgaben des WWS, wie die Prognose von $D(i)$ und $P(i)$. Dazu ist die Periodisierung der Zu- und Abgänge und die Verwendung der Zeitreihenanalyse sinnvoll. Der Sicherheitsbestand $b_s(i)$ kann ebenfalls per Zeitreihenanalyse ermittelt werden, wobei aber keine Periodisierung in fixe Intervalle erfolgen sollte. Stattdessen können die letzten Minimalbestände verwendet werden. Gleichmaßen lassen sich auch Maximalbestände und darüber die Losgrößen bestimmen. Um Beginn und Ende von Losen feststellen zu können bleibt nur, Unterbrechungen des Zugangs zu detektieren.

Generell ist Fähigkeit zur Bedarfsprognose eher auf Seiten des WWS ausgeprägt, während das LVS Vorteile bei der lagereinheitsbasierten Betrachtung und Prognose hat.

6.4.2. Artikelklassen

Eine weitere Dimension des Praxiseinsatzes von Verweildauerprognoseverfahren sind grundsätzlich verschieden geartete Artikelklassen. Der erste Schritt einer aussagekräftigen Prognose

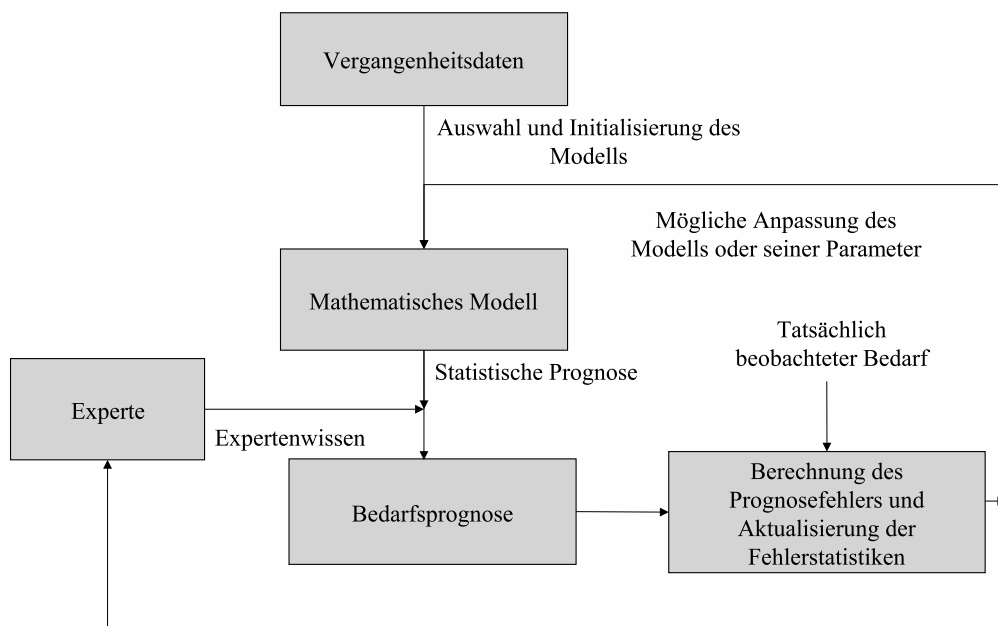


Abbildung 6.2.: Prognoseprozess nach SILVER, PYKE und PETERSON [SPP98, S. 74]

besteht immer in der Auswahl eines angemessenen Modells [SPP98, S. 83]. Dieses Modell soll einen Zusammenhang zwischen der durch Variablen beschriebenen Situation und der Zielgröße „Verweildauer der Lagereinheit“ herstellen. Auf Basis der Ausprägungen der Variablen, z. B. aus in der Vergangenheit beobachteten Verweildauern oder dem Artikelindex, soll prognostiziert, also eine Schätzung der Zielgröße berechnet werden. Dazu müssen Korrelationen oder gar Kausalitäten zwischen den Variablen untereinander und in Bezug auf die Zielgröße gefunden und im Modell verarbeitet werden.

Veranschaulicht man sich, wie die Verweildauer einer einzelnen Lagereinheit Resultat der Wechselwirkungen verschiedenster Prozesse sein kann, wird deutlich, dass die Anzahl der für die Modellbildung potentiell in Frage kommenden Variablen groß ist. Die Notwendigkeit manueller Einflussnahme auf die Ergebnisse der Bedarfsprognose wird in vielen Quellen immer wieder betont (z. B. in [SPP98, S. 74][Nah97, S. 99][SK08, S. 141f.]).

Die Schwierigkeit der Veweildauerprognose für Lagersysteme besteht nun darin, dass in einem Lager als technischer Einrichtung i. d. R. nicht ausschließlich dispositive Artikel gelagert sind, welche nach EOQ oder einem abgeleiteten Modell disponiert und kontinuierlich verbraucht werden. Bei diesen Artikeln fehlt der typische sägezahnartige Verlauf der Bestandshöhe. Sie können folgendermaßen klassifiziert werden:

Artikel mit unterbrochenem Verbrauch Hierbei handelt sich um die in Abschnitt 6.3.2 auf Seite 99 genannten Zwischenprodukte bzw. Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe. Sowohl

6. Verweildauerprognose

Zu- als auch Abgang erfolgen mit Unterbrechungen. Die Artikel werden zwar disponiert, dies erfolgt aber mit einfachen Verfahren wie z. B. dem im Abschnitt 2.2.1 auf Seite 15 genannten Verfahren der Auffüllung auf einen Sollbestand.

Warteschlangen Bei diesen Artikeln handelt es sich ebenfalls meist um Zwischenprodukte deren Bestandshöhe stochastisches Verhalten zeigt. Zu- und Abgänge werden nicht disponiert. Die Grenzen zwischen Beständen von Artikeln mit unterbrochenem Verbrauch und Warteschlangen sind fließend. Sie werden mehr durch das Ausmaß der Planung des Bestandes definiert als durch die Form des Bestandsverlaufes. In statistischer Auswertung weisen die Zeiten zwischen Ein- und Auslagerungen von Lagereinheiten beider Artikelklassen eine hohe Varianz auf. Diese führt zu zwangsläufig unsichereren Prognosen.

Flächenbedarfsschonende Lagerung Lagereinheiten einzelner Artikel sind dauerhaft auf unabsehbare Zeit gelagert. Bestandszu- oder -abgänge finden praktisch nicht statt. Die Bestände unterliegen keiner Bestandsplanung. Solche „Artikel“ sind z. B. selten benötigte Sondergeräte, welche aus Platzgründen auf einer Palette im Lager untergebracht werden. Ihr Bestand kann direkt von der verfügbaren Lagerkapazität abgezogen werden.

Aktionsware Für Artikel, welche Gegenstand von Vertriebsaktionen sind, wird einmalig Bestand auf- und wieder abgebaut. Oft sind diese Artikel nicht dauerhaft lagerhaltig. Bestand und Bestandsverlauf werden außerhalb des gewöhnlichen Prognoseprozesses geplant. Handelt es sich bei den Aktionsartikeln um auch sonst lagerhaltige Artikel, ist für die Aktionskomponente eine gesonderte Planung notwendig, da die Aktionsbestände von der statistischen Prognose nicht erfasst werden können. Hierbei handelt es sich um einen der Gründe, weshalb ein Prognoseverfahren manuelle Korrektur zulassen muss.

Anbruch Bei sinnvoller Wahl des Ladungsträgers im Lager enthält eine Lagereinheit mehrere Artikeleinheiten. Bei Entnahme von Artikeleinheiten vom Ladungsträger entstehen teilgefüllte Lagereinheiten. Werden diese rückeingelagert, ist übliche Praxis, sie auch bevorzugt wieder auszulagern, um die Anhäufung teilgefüllter Lagereinheiten im Lager zu vermeiden. Dadurch werden Anbruchlagereinheiten mit höherer Frequenz bewegt. Weiterhin entspricht so die Zuordnung von Ein- und Auslagerungen zwar noch der FIFO-Strategie in Bezug auf die Ersteinlagerung der Artikeleinheiten, nicht aber der an der Schnittstelle zum Lager beobachtbaren Reihenfolge. Anbruchlagereinheiten jedes einzelnen Artikels bilden deshalb eine eigene Kategorie und müssen für eine optimale Umsetzung von Schnellläuferstrategien gesondert behandelt werden.

GUDEHUS spricht im Zusammenhang mit Warteschlangen und flächenbedarfsschonender Lagerung vom Puffern bzw. Speichern [Gud05, S. 356]. Die Berechnung einer mittleren Verweildauer für Lagereinheiten gepufferter Lagereinheiten erfordert bedientheoretische Betrachtungen. Die Lagereinheiten gespeicherter Güter können in vollem Umfang als dauerhafter Lagerbestand mit unendlicher Verweildauer angenommen werden. Für Aktionsware muss auf Expertenwissen zurückgegriffen werden. Diese unterschiedlichen Charakteristika der Artikel führen zur Notwendigkeit, die Artikel eines Lagers im Rahmen der Prognose zu klassifizieren.

6.4.3. Prognoseanforderungen

Wie bereits ausgeführt unterscheiden sich die Anforderungen an eine Verweildauerprognose von den Anforderungen an die Bedarfsprognose. Im Folgenden werden die Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Bedarfsprognose und Verweildauerprognose präzisiert. Die Untergliederung folgt den Eigenschaften *idealer* und *angemessener* Prognoseverfahren nach SILVER, PYKE und PETERSON [SPP98, S. 78f.].

Ein ideales Prognoseverfahren muss ...

1. ... die gesuchte Größe prognostizieren.
Die Prognose des Bedarfs allein ist für die Verweildauerbestimmung nicht ausreichend. Erst zusätzliche Mengenprognosen- bzw. -berechnungen ermöglichen die Bestimmung der Zielgröße.
2. ... die zu erwartenden Prognosefehler abschätzen.
Schätzungen der Prognosefehler sind wichtige Indikatoren, um die Eignung des Prognoseverfahrens für einen Artikel zu bewerten oder um die Notwendigkeit manueller Eingriffe zu erkennen.
Für die Verweildauerprognose und Schnellläuferstrategien wären Fehlerschätzungen für die Berechnung des Intervalls nötig, in dem die Lagerleistung zu erwarten ist.
3. ... die Prognose rechtzeitig erstellen.
Bedarfsprognose wird periodisch, z. B. wöchentlich, ausgeführt. Rechtzeitigkeit bezieht deshalb sich bei der Bedarfsprognose darauf, für jeden einzelnen Artikel des Sortiments innerhalb einer Periode eine Aussage treffen zu können.
Bei der Verweildauerprognose ist insbesondere bei lagereinheitsbezogener Betrachtung die aktuelle Situation relevant. Die Prognose muss deshalb in Echtzeit⁴ erfolgen.
4. ... die Prognose periodisch aktualisieren, um das Revidieren von Entscheidungen zu ermöglichen.
Die Bedarfsprognose wird ohnehin periodisch wiederholt.
Eine aktualisierte Verweildauerprognose bietet keine Möglichkeit Spielzeitverbesserungen zu erzielen, nachdem eine Lagereinheit eingelagert wurde. Lediglich Kandidaten für Umlagerungen lassen sich besser bestimmen weil die Verweildauerverteilung besser den momentanen Gegebenheiten entspricht.
5. ... die Kosten der Erstellung der Prognose mit den Kosten der Prognosefehler abwägen.
Bedarfsprognosefehler müssen durch Sicherheitsbestände abgefangen werden, was Kapitalbindungs- und Lagerkosten verursacht. Andernfalls entstünden direkt entgangene Umsätze oder Produktionsausfälle durch Fehlbestände. Dies rechtfertigt i. d. R. erhebliche Aufwände zur Erstellung der Prognose. Praktisch werden Artikel in Abhängigkeit von den Kosten der Fehler klassifiziert, wobei für unterschiedliche Klassen auch unterschiedlich aufwändige Prognoseverfahren zum Einsatz kommen.
Bei der Verweildauerprognose hängt die Bewertung der Fehler davon ab, wie nahe der

⁴Echtzeit bedeutet garantierte maximale Antwortzeit. Diese liegt hier längstens im Sekundenbereich.

6. Verweildauerprognose

Durchsatz des Lagers an dessen Grenzleistung liegt. Einzelne, selbst drastische Fehleinschätzungen haben nur sehr partiellen Einfluss auf das Optimierungsergebnis. In Anbetracht der großen Anzahl zu erstellender lagereinheitsbezogener Prognosen darf diese Prognose nur vernachlässigbaren Aufwand verursachen. Deshalb wird diese Prognose per Software erfolgen.

6. ... menschliche Eingriffe zur Korrektur der maschinellen Prognose ermöglichen.
Prozesse zur Bedarfsprognose schließen Schritte zur manuellen Beeinflussung der Prognose ein (s. Abb. 6.2).
Eine Notwendigkeit für manuelle Eingriffe bei der Verweildauerprognose besteht nur dann, wenn größere Mengen Lagereinheiten einzulagern sind, für welche keine Vergangenheitsdaten vorliegen. Ob ein Eingriff gerechtfertigt oder erforderlich ist, muss im Einzelfall in Hinblick auf Kosten und Nutzen abgewogen werden.
7. ... robust sein, d. h. die Prognose darf nicht sensibel auf unkontrollierbare Faktoren reagieren.
Bei der Bedarfsprognose soll diese Eigenschaft durch Auswahl und Verwendung verschiedener, artikelspezifischer Verfahren, sowie nachträgliche Überprüfung und Korrektur durch Experten hergestellt werden.
Die Robustheit der Verweildauerprognose hat geringes Gewicht. Zonenbildende Strategien weisen durch die stark verallgemeinernde Abbildung verringerte Sensibilität des Optimierungsergebnis auf. Auch bei lagereinheitsbezogenen Entscheidungen und Dynamischer Zonierung hat eine einzelne Entscheidung nur geringen Einfluss. Die in Abschnitt 6.5 auf Seite 111 dargestellten Simulationsergebnisse bestätigen diese Aussage. Dennoch muss die Auswahl des Prognoseverfahrens mit Sorgfalt erfolgen, um systematisch fehlerhafte oder erratische Prognosen zu vermeiden. An dieser Stelle besteht Forschungsbedarf.

Das *angemessene* Prognoseverfahren hängt ab von ...

8. ... der Anzahl und Kompetenz der Prognoseersteller.
Die Bedarfsprognose ist eine Domäne betriebswirtschaftlich, volkswirtschaftlich und statistisch geschulter Fachabteilungen. Deshalb können auch methodisch anspruchsvolle Verfahren zum Einsatz kommen. Die Ergebnisse der Prognose werden wenigstens schwerpunktmäßig mit der Geschäftsleitung und anderen Abteilungen diskutiert.
Für die Verweildauerprognose steht, wenn überhaupt, nur statistisch ungeschultes Personal zur Verfügung.
9. ... dem Prognose-Budget.
Das Budget für die Bedarfsprognose stellt die technische Basis, ausreichende Anzahl und Kompetenz der Prognoseersteller sicher.
Dem gegenüber steht für die Verweildauerprognose, abgesehen von der Anfangsinvestition in die entsprechende Software, kein Budget explizit zur Verfügung. Sicherstellung der Verweildauerprognose ist eine Nebenaufgabe der Lagerbetreiber.

10. ... dem Zweck der Prognosen, inkl. der erforderlichen Antwortzeit und Genauigkeit.
Die Bedarfsprognose stellt hohe Anforderungen an die Genauigkeit und nur geringe an die Antwortzeit. Bei der Verweildauerprognose ist das Gegenteil der Fall.

11. ... der Verfügbarkeit von Daten.

Die Bedarfsprognose verfügt über eine breite Datenbasis aus unterschiedlichen Quellen, wie z. B. Marktanalysen, eigenen Vergangenheitsdaten, Planungsdaten von Partnern in der Supply-Chain *etc.* Im Bedarfsfall, über den im Einzelnen entschieden wird, integriert man auch datentechnisch nicht erfasstes Expertenwissen in den Prognoseprozess. Dagegen stehen der Verweildauerprognose wegen der genannten Schnittstellenproblematik nur sehr begrenzt Daten zur Verfügung, auf die sich eine Prognose stützen könnte.

12. ... der Fähigkeit des Personals zum Umgang mit ausgefeilten, statistischen oder anderen Verfahren.

Prognoseverfahren erfordern Aufwand. Sind denjenigen, welche diesen Aufwand erbringen müssen, der Nutzen und die Folgen ihrer Handlungen unklar, leidet die Qualität der Prognose. Dies kann durch Fehlinterpretationen, Unterlassung von Korrekturen oder gar bewusste Manipulation erfolgen. KALLINA weist auf einen solchen Fall hin [Kal78]. Auch SILVER, PYKE und PETERSON heben diesen Punkt hervor:

„It is easy to plug data into a computer program and take output as fact. It is not as easy to understand the output and to use it properly.“[SPP98]

Ein Verfahren zur Verweildauerprognose muss deshalb minimalen Erstellungsaufwand mit geringen Anforderungen an die Fähigkeiten des Personals verknüpfen (s. Punkte 5, 6 und 8).

Aus den idealen und angemessenen Eigenschaften der Prognoseverfahren sowie den zu behandelnden Artikelklassen und Steuerungsebenen ergibt sich für die Verweildauerprognose ein Anforderungsprofil. Das gesuchte Verweildauerprognoseverfahren

- läuft weitgehend autonom innerhalb nur einer Steuerungsebene ab,
- integriert die qualitativ hochwertigeren Daten der Bedarfsprognose,
- erlaubt manuelle Einflussnahme auf die Bewertung einzelner Lagereinheiten oder ganzer Lose auch durch gering qualifiziertes Personal,
- identifiziert selbstständig die Zugehörigkeit der Artikel zu den Artikelklassen und bringt darauf basierend verschiedene Verfahren zur Verweildauerprognose zum Einsatz und
- kann die eingesetzten Verfahren autonom initialisieren.

Je nach Einsatzfall wird den verschiedenen Kriterien, z. B. im Rahmen einer Nutzwertanalyse, unterschiedlich viel Gewicht beigemessen werden. Angesichts der verschiedenartigen Artikelklassen und Anforderungen wird das gesuchte Verfahren hybrid sein, d. h. verschiedene Verfahren integrieren und diese artikelorientiert zur Anwendung bringen. Das Prognoseverfahren wird innerhalb der LVS-Software gekapselt, bietet aber die Möglichkeit per Steuerungstelegramm aus dem WWS oder durch Bedienereingaben unterstützt zu werden.

6.4.4. Umsetzung – Ein Vorschlag

6.4.4.1. Bewertung

Sucht man unabhängig vom Einsatzfall Verfahren, welche dem genannten Anforderungsprofil entsprechen, stellt sich die Frage nach der Bewertung von deren Eignung. Um diese beurteilen zu können, stehen prinzipiell vier Methoden zur Verfügung [Mer94, S. 339]:

1. *Theoretische Überlegungen* – Diese Methode versucht durch das Herausarbeiten von Charakteristika der zu prognostizierenden Prozesse, die Eignung von Verfahren zu beurteilen.
2. *Beurteilung durch Prognoseexperten* – Die Eignung von Verfahren für die lagereinheitsbasierte Verweildauerprognose aus Expertenaussagen herzuleiten kann praktisch nicht erfolgen, da solche nur sehr begrenzt verfügbar sind.
3. *Test anhand synthetischer oder realer Daten* – Der Test einzelner Verfahren im Anwendungsfall ist die sicherste Methode belastbare Bewertungen zu erzielen.

„In our view questions of this kind cannot be usefully answered through abstract considerations of the characteristics of the various procedures, but rather must be attacked through examination of the forecasting methods in action“ [GN77]

Da die Verweildauern keinen Zeitreihencharakter aufweisen, fehlt es bereits an einem geeigneten Normal, wie es die Naive Prognose für Zeitreihenprognosen darstellt. Die Bewertung der Eignung verschiedener Verfahren bedarf deshalb aktiver Interpretation.

4. *Auswertung der Häufigkeit des praktischen Einsatzes der Verfahren* – Der praktische Einsatz lagereinheitsorientierter Verfahren ist nicht belegt, wodurch auch diese Möglichkeit ausscheidet. Zu Art und Häufigkeit des Einsatzes artikelbasierter Prognoseverfahren liegen ebenfalls keine Untersuchungen vor.

Methode 3, eine genaue und vergleichende Analyse verschiedener Prognoseverfahren, erfordert Untersuchungen in einem Ausmaß, welches im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden kann. Deshalb wird hier nach Methode 1 unter Berücksichtigung der Charakteristika des Einsatzgebiets lediglich ein Vorschlag zur Umsetzung unterbreitet, welcher als Ansatzpunkt für weiterführende Untersuchungen und kritische Überprüfung nach den Methoden 2 bis 4 dienen soll.

Aus den vorhergegangenen Abschnitten kann nur das Fazit gezogen werden, dass ein perfektes Prognoseverfahren zur Verweildauerprognose bei Einsatz von Schnellläuferstrategien nicht gefunden werden kann. Dies bedeutet offenbar nicht, dass nicht bereits ausreichende Verfahren zur Verfügung stünden, wie der mit 90% hohe Anteil von Implementierungen ABC-zonierenden Strategien nebst Nachfrage danach zeigen [Fig00, tHW01].

Praktisch kann nicht ausgeschlossen werden, dass das im Folgenden beschriebene Verfahren oder Teile davon bereits so oder ähnlich im Einsatz sind. Als Komponenten proprietärer Software sind sie einem Diskurs jedoch nicht zugänglich. In der Hoffnung einen solchen zu beginnen wird deshalb die Möglichkeit genutzt, konkrete Verfahrensansätze zu benennen.

6.4.4.2. Datenerhebung

Für jeden Artikel werden im LVS Vergangenheitsdaten gesammelt und gespeichert, welche die Datenbasis für eine statistische Auswertung im Rahmen der Prognose bilden. Dazu muss ein geeigneter Zeithorizont gefunden werden, über den die Daten im LVS verfügbar bleiben. Es empfiehlt sich diesen Zeitraum nicht absolut anzugeben, sondern auf Basis der Anzahl der beobachteten Ereignisse für jeden Artikel separat zu beschreiben. Der Zeitraum sollte den Durchlauf mehrerer Lose erfassen und jeweils mehr Ereignisse beinhalten als Lagereinheiten beim Maximalbestand gelagert sind. Werden Daten über diesen Zeitraum ohne Gewichtung ausgewertet und gemittelt, entspricht das der Berechnung gleitender Mittelwerte. Von der Verwendung zeitabhängiger Gewichtung, z. B. durch exponentielles Glätten, ist abzusehen, da u. U. Teillose in unterschiedlichen Phasen bewertet werden. Dabei besteht die Gefahr der systematischen Verfälschung der Schätzwerte in Abhängigkeit vom Zeithorizont und der Losgröße.

Bei den zu erfassenden Daten handelt es hauptsächlich um die Zeitpunkte der Einlagerungen und die Zeitpunkte der Auslagerungen. Aus Anzahl und Ausprägung dieser Werte lassen sich die für die Prognose benötigten Größen ableiten. In der Umsetzung wird es sinnvoll sein, auch bereits abgeleitete Größen und Zwischenergebnisse vorzuhalten, um wiederholte Berechnungen zu vermeiden. Die abzuleitenden Größen sind

1. *die Zeiten zwischen Ein- und Auslagerungen.* Diese Zeiten bilden die Basis für die Klassifizierung der Artikel (s. Abschnitt 6.4.4.3).
2. *die Zugangs- und die Abgangsrate.* Zugangs- und Abgangsrate werden sowohl für die lagereinheitsbasierte als auch für die artikelbasierte Prognose benötigt.
3. *der Bestandsverlauf.* Unter Verwendung einer zeitbezogenen Bestandshöhe lässt sich der gesamte Bestandsverlauf rekonstruieren. Dieser bildet die Grundlage der Bestimmung von Minima und Maxima der Bestände eines Artikels, sowie der mittleren gelagerten Menge.
4. *die tatsächlichen Verweildauern.* Nach Zuordnung wenigstens einer Auslagerzeit zu einer Einlagerzeit lassen sich die beobachteten Verweildauern berechnen.

6.4.4.3. Klassifizierung

Für die Klassifizierung der Artikel und die korrekte Auswahl der anzuwendenden Prognoseverfahren wird festgestellt, ob Ein- oder Auslagerungen losweise erfolgen. Dazu werden sowohl die Zeiten zwischen aufeinanderfolgenden Einlagerungen als auch die Zeiten zwischen aufeinanderfolgenden Auslagerungen von Lagereinheiten jedes einzelnen Artikels als Mengen $Z_I(i)$ und $Z_O(i)$ gespeichert. Die Mengen $Z_I(i)$ und $Z_O(i)$ werden mittels des *k-means*-Algorithmus in je zwei Cluster A und B aufgeteilt (s. [HS03]). Der Cluster A enthält dabei alle Zeiten zwischen Lagereinheiten innerhalb eines Loses und der Cluster B alle Zeiten zwischen verschiedenen Losen.

Sind die Zeiten $a \in A$ und die Zeiten $b \in B$ soll der Abstand der Mittelwerte aus beiden Clustern $|\bar{a} - \bar{b}|$ die Standardabweichungen σ_A und σ_B deutlich übersteigen. Ist das nicht der

6. Verweildauerprognose

Zugänge	Abgänge	Artikelklasse	Prognoseverfahren
kontinuierlich	kontinuierlich	Warteschlange, Anbruch, Initialisierungsphase	artikelbasiert
kontinuierlich	losweise	Zerreißlager	lagereinheitsbasiert
losweise	kontinuierlich	Staulager	lagereinheitsbasiert
losweise	losweise	Artikel mit unterbrochenem Verbrauch (und Zugang)	artikelbasiert

Tabelle 6.1.: Artikelklassifikation

Fall oder schlägt der *k-means*-Algorithmus fehl⁵, erfolgen Zu- bzw. Abgänge nicht losweise sondern kontinuierlich oder die Datenbasis ist für eine erfolgreiche Clusterung noch nicht ausreichend. In Tabelle 6.1 ist die Zuordnung der Analyseergebnisse zu Artikelklassen dargestellt.

6.4.4.4. Prognose

Die lagereinheitsbasierte Prognose bedarf zuerst der Bestimmung der Größen $D(i)$, $P(i)$ und $b_s(i)$. Kann dieses Tupel über eine Schnittstelle durch das WWS zur Verfügung gestellt werden, sollte auf diese Möglichkeit zurückgegriffen werden. Das LVS kann die qualitativ hochwertigeren Daten direkt verwenden und die Initialisierung abkürzen. Wird das Tupel nur für geeignete Artikel gesendet, kann auch die Artikelklassifizierung unterbleiben. Stehen keine Daten aus dem WWS zu Verfügung müssen $D(i)$ und $P(i)$ aus Vergangenheitsdaten berechnet werden. Dabei bezieht man nur die Zeiten des Intra-Los-Clusters A in die Berechnung ein. Der Sicherheitsbestand $b_s(i)$ wird aus den Minimalbeständen berechnet. In Verbindung mit den beobachteten Maximalbeständen lässt sich auch $Q(i)$ für den Zerreißlagerfall bestimmen. Zuletzt bleibt, den Lagereinheitsindex j festzustellen. Dazu muss die Zählung der Lagereinheiten zum richtigen Zeitpunkt zurückgesetzt werden. Dies kann per Steuerungstelegramm vom WWS ausgelöst werden. Alternativ muss ein Schwellwert festgelegt werden, bei dessen Erreichen das Rücksetzen der Zählung erfolgt. Dieser Schwellwert entspricht einer Zeitspanne innerhalb derer keine Ein- bzw. Auslagerungen von Lagereinheiten des Artikels stattgefunden haben. Für den Schwellwert x gilt

$$\max(\sigma_A, \sigma_B) < x < |\bar{a} - \bar{b}| . \quad (6.7)$$

Für die artikelbasierte Prognose stehen prinzipiell zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Entweder man berechnet $D(i)$ und $m(i)$ aus gespeicherten Daten und erlangt die Verweildauer nach Gleichung (6.1) oder man greift direkt auf beobachtete, gespeicherte Verweildauern von Lagereinheiten des Artikels zurück.

SCHULZE verweist auf eine Möglichkeit, auch für Warteschlangen Durchlaufzeiten einzelner Forderungen zu prognostizieren [Sch00]. Gelänge es seine auf rekurrenten neuronalen

⁵Der *k-means*-Algorithmus muss nicht konvergieren oder kann leere Cluster liefern, wodurch er abgebrochen werden muss. Beide Ereignisse sind für die vorliegende Anwendung ausreichende Ergebnisse, da nicht die Zuordnung einzelner Zeiten zu den Clustern bestimmt werden muss, sondern nur ob zwei Cluster identifiziert werden können.

Netzen beruhende Bediensystemprognose auf Lagereinheiten anzuwenden, wären lagereinheitsbasierte Verweildauern auch für die Artikelklasse Warteschlangen nutzbar. Gegebenenfalls könnte das Verfahren generell angewandt werden, wofür aber noch Fragen der Initialisierung und des Netz-Trainings zu beantworten wären.

6.4.4.5. Initialisierung und externe Einflussnahme

Beim Betrieb von Lagern kommt es wiederholt zur Einlagerung von Artikeln, für die keine historischen Daten zur Verfügung stehen. Für den Einsatz in weitgehend autonom arbeitender Prognosesoftware sind deshalb Verfahren erforderlich, welche

- keiner artikelspezifischen Initialisierung von Parametern bedürfen,
- in der Lage sind, eine solche Initialisierung autonom vorzunehmen oder
- eine Parametrierung durch ungeschultes Personal ermöglichen.

Ohne externe Einflussnahme können für die ersten eingelagerten Lagereinheiten eines Artikels keine statistisch fundierten Verweildauern prognostiziert werden. Ein Durchsatz oder beobachtete Verweildauern liegen noch nicht vor. Die Lagerorte für solche Lagereinheiten sollten zufällig gleichverteilt gewählt werden, weil dadurch die Grundannahmen der Lagerortbestimmung für andere Artikel nicht systematisch beeinträchtigt werden. Unter Dynamischer Zonierung erfolgt die Lagerortwahl über die zufällige Wahl des Verweildauerquantils im Intervall $[0,1]$.

Per Benutzereingabe lässt sich ein Quantil auch direkt vorgeben. Über die Beantwortung der Frage „Welcher Anteil des Lagerbestandes verweilt voraussichtlich weniger lange im Lager als die einzulagernde(n) Lagereinheit(en)?“ wird der Begriff des Verweildauerquantils zugänglich und sollte auch statistisch weniger bewandertem Personal ermöglichen, die richtige Größenordnung der Verweildauer zu schätzen. Im Extremfall kann bei Einlagerung jeder einzelnen Lagereinheit die genannte Frage beantwortet und so die Verweildauerprognose des LVS komplett durch externe Einflussnahme abgelöst werden.

Lassen sich auf Basis von Vergangenheitsdaten Verweildauern berechnen, kommt direkt das artikelbasierte Verfahren zur Anwendung. Es wird beibehalten, bis ggf. die Artikelklassifizierung den Stau- oder Zerreißlagerfall detektiert. In diesen Fällen wird auf die lagereinheitsbasierte Berechnung umgeschwenkt. Der Index j lässt sich dann aus der Historie bestimmen.

Geeignete Initialisierung ist besonders bei der Lagerung von Aktionsware von Interesse. Hier können weder historische Daten verwendet noch neue im Betrieb gesammelt werden, welche sich später für Prognosen nutzen ließen. Bei Einlagerung von Lagereinheiten für eine Aktion empfiehlt sich die explizite Angabe des Aktionszeitraumes und der Größe des „Aktionsloses“, wodurch lagereinheitsspezifische Verweildauern berechenbar werden.

6.5. Einfluss des Prognosefehlers

Unabhängig von den verwendeten Prognoseverfahren können die Strategien auf ihre Robustheit gegenüber Prognosefehlern untersucht werden. Zwecks Einschätzung des Einflusses die-

6. Verweildauerprognose

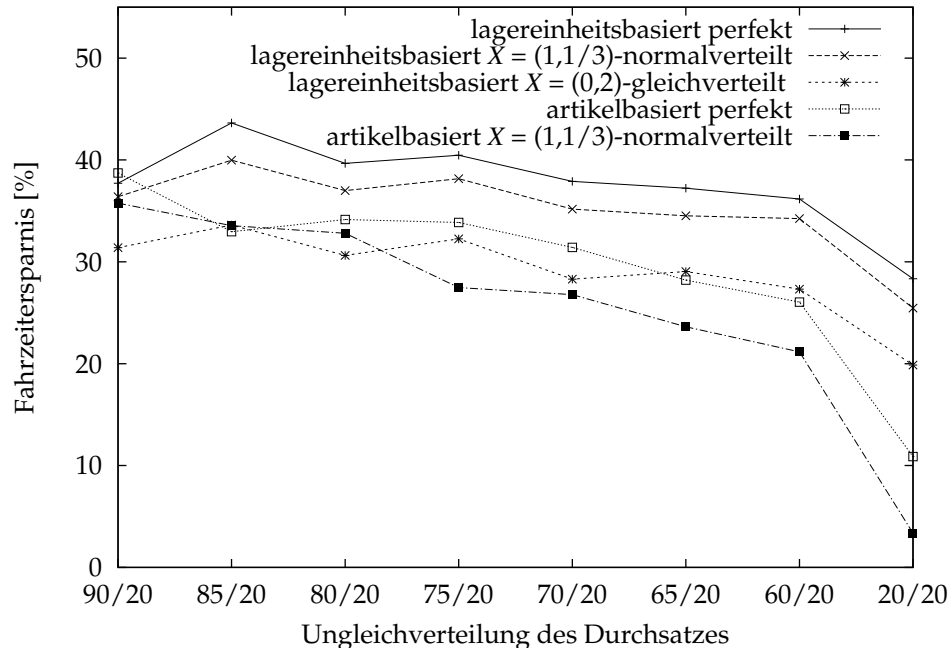


Abbildung 6.3.: Einfluss des Prognosefehlers auf eine klassische Schnellläuferstrategie 3/S/T (1000 Artikel, Lagerfüllgrad 91%)

ser Fehler auf das Optimierungsergebnis, wurden Simulationsläufe durchgeführt, bei denen die perfekte Prognose gezielt verfälscht wurde. Dazu wurden jeder einzelnen prognostizierten Verweildauer Zufallsverteilungen überlagert.

$$t_{VWerr}^* = t_{VW}^* \cdot X$$

Dabei handelt es sich bei X einmal um eine $N(1, \frac{1}{3})$ -normalverteilte Zufallsvariable und einmal um eine im Intervall $(0, 2)$ -gleichverteilte Zufallsvariable. Negative Verweildauern wurden auf 0 korrigiert.

In Abbildung 6.3 ist der Einfluss eines Prognosefehlers auf eine 3/S-Strategie dargestellt. Zum Vergleich ist auch der Unterschied zwischen lagereinheitsbasierter und artikelbasierter Prognose ersichtlich. Bei lagereinheitsbasierter Prognose fällt die Leistungseinbuße etwas geringer aus als bei artikelbasierter Prognose.

In Abbildung 6.4 ist der Einfluss eines Prognosefehlers auf eine 3/S-Strategie im Vergleich zum Einfluss auf die Dynamische Zonierung dargestellt. Die Strategie ADAPTIVE ist als Zwischenform ebenfalls aufgeführt. Alle Prognosen waren lagereinheitsbezogen. Der Verlust an Strategiegewinn durch die Prognosefehler ist bei 3/S und DYN nahezu identisch. Im 60/20-verteilten Sortiment sinkt die Fahrzeiterparnis um 22,8% (9,3% absolut) bei DYN und um 24,5% (8,8% absolut) bei 3/S. In Anbetracht dessen, dass der gleichverteilte Fehler $\pm 100\%$ der tatsächlichen Verweildauer betrug, kann der Strategiegewinn als robust bezeichnet werden. Lediglich ADAPTIVE zeigt einen etwas ausgeprägteren Einbruch der Fahrzeiterparnis bei mittlerer Ungleichverteilung im Sortiment.

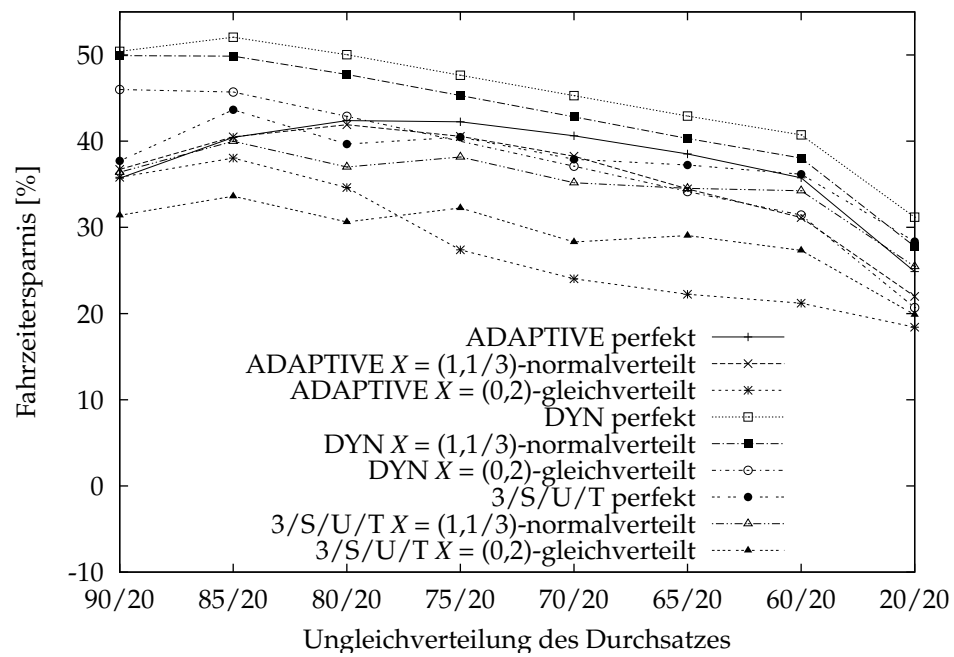


Abbildung 6.4.: Schnellläuferstrategien bei Prognosefehlern (1000 Artikel, Lagerfüllgrad 91%)

7. Zusammenfassung und Ausblick

7.1. Fazit

In der Darstellung der Motivation für die Dynamische Zonierung wurden aus den Mängeln herkömmlicher Verfahren folgende Ansatzpunkte für Verbesserungen von Schnellläuferstrategien abgeleitet (s. Abschnitt 5.1 auf Seite 51):

1. Vereinfachung bzw. Vermeidung der Klassen- und Zonenbildung
2. Vereinfachung bzw. Vermeidung der Klassen- und Zonenanpassungen
3. besseres Erschließen des Optimierungspotentials
4. bessere Vorhersagbarkeit der praktisch erzielbaren Fahrzeiteinsparungen

Die Dynamische Zonierung liefert für die Punkte 1 und 2 eine umfassende Lösung und erzielt bei Punkt 3 Fortschritte. Dabei vereint die Dynamische Zonierung zwei wichtige Eigenschaften in sich: Sie ist sowohl die einfachste als auch die leistungsfähigste Schnellläuferstrategie. Dafür sorgt die konsequente Anwendung zweier Verfahren, welche bereits einzeln sinnvoll sind, aber erst gemeinsam ihr volles Potential entfalten:

Die Abbildung der Verweildauerverteilung auf die Fahrzeitverteilung erübrigt jegliche Zonierung. Damit entfallen die Aufwände für Planung und Berechnung von Zonengrenzen und -zuordnungen und das Hauptargument gegen eine hohe Zonenanzahl wird obsolet. Gleichzeitig kann so die bei Zonenbildung unvermeidliche Abbildungsunschärfe beseitigt werden. Eine von einer optimalen Zuordnung abweichende Lagerortwahl resultiert nun ausschließlich aus Prognosefehlern. Auch bei herkömmlicher artikelorientierter Betrachtungsweise kann die Dynamische Zonierung dadurch Leistungsvorteile herausarbeiten.

Die lagereinheitsbasierte Verweildauerbetrachtung als zweite Säule der Dynamischen Zonierung stellt die korrekte Umsetzung des als optimal nachgewiesenen CPO-Kriteriums dar. Ohne Zwang zur Zonenbildung fehlen die der Verwendung lagereinheitsbasierter Verweildauern sonst entgegenstehenden algorithmischen Mehraufwände. Dass auch die Prognose lagereinheitsbasierter Verweildauern für Teile des Sortimentes nicht zu Mehraufwand sondern zur Vereinfachung des Verfahrens führt, spricht zusätzlich für die lagereinheitsbasierte Betrachtung.

Obwohl das lagerdurchsatzsteigernde Potential von Schnellläuferstrategien unbestritten ist, haben diese Nachteile, welche ihr Potential grundsätzlich einschränken: Sie können nur die variablen Anteile der Spielzeit verkürzen und bei den angestrebten kurzen Wegen wirken sich die Beschleunigungs- und die Verzögerungsphase besonders ungünstig auf die Fahrzeit aus. Lagergestaltungsmöglichkeiten, wie der Einsatz von Mehrfachlastaufnahmemitteln

oder mehrfachtiefe Lagerung, schränken das Optimierungspotential von Schnellläuferstrategien ebenfalls ein. Ersteres erhöht die Wahrscheinlichkeit doch noch weite Wege innerhalb eines Arbeitsspiels zurücklegen zu müssen, letzteres verkürzt grundsätzlich die Wege auf Kosten zusätzlicher fixer Spielzeitanteile. Schnellläuferstrategien verbessern die Grenzleistung des Lagers insgesamt. Zeitlich begrenzt können dagegen andere Strategien größere Potentiale erschließen.

Die lagereinheitsbasierte Betrachtungsweise fügt der Steuerung des Lagers eine zusätzliche Dimension hinzu. Lagereinheiten werden durch die Zuordnung von Verweildauern individualisiert. Die Lagereinheiten eines Artikels können dadurch nicht mehr als äquivalente Menge betrachtet werden. Ausfälle von Lagergassen, Lastbalancierung von Lagergassen oder gleichzeitige Bereitstellung mehrerer Lagereinheiten eines Artikels mit nachfolgender Rückeinlagerung durchbrechen die strengen Annahmen, welche eine lagereinheitsbezogene Verweildauerbestimmung ermöglichen. Die lagereinheitsbasierte Verweildauerprognose behebt so die systematische Fehlprognose der artikelbasierten Betrachtung u. U. nur auf Kosten des Entstehens neuer Quellen für Prognosefehler. Hierin ist auch die Einschränkung bei der Erschließung des Optimierungspotentials begründet (Punkt 3) und eine der Ursachen dafür zu suchen, warum die Quantifizierung der praktisch erzielbaren Leistungsverbesserungen (Punkt 4) nur unzureichend möglich ist.

Gerade bei den für die Anwendung von Schnellläuferstrategien besonders interessanten hohen Auslastungsgraden der Lagergeräte treten starke Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Lagerstrategien auf. Hoher Auslastungsgrad führt zu hohem Doppelspielanteil, welcher die Auswirkungen der konkreten Position fahrzeitgünstiger gelegener Lagereinheiten egalalisieren kann. Hinzu kommen die bei hohem Auslastungsgrad stärkeren Auswirkungen der arbeitsspiellorientierten Auftragsauswahl (Interleaving). So entsteht eine mehrdimensionale Strategiesituation, welche den Aufwand, der zur generellen Bewertung der Auswirkungen einzelner Strategien betrieben werden muss, potenziert. Weiterhin werden Schnellläuferstrategien praktisch in einem Umfeld betrieben, welches in mehreren Dimensionen transient ist. Letztlich steht keine allgemeingültige, auf den Einzelfall direkt anwendbare Aussage zur exakten Höhe des erzielbaren Leistungsgewinns zur Verfügung. Gleichwohl lässt sich für den Einzelfall dennoch zumindest eine obere Schranke der erreichbaren Leistung bestimmen. Dabei ist der Aufwand unter Berücksichtigung der Dynamischen Zonierung nicht höher als bei der Verwendung herkömmlicher Schnellläuferstrategien. Von höherem praktischen Nutzen als die Berechnung einer oberen Schranke wäre die Berechnung einer unteren Schranke, welche aber präzise Aussagen zu Prognosefehlern erfordert.

7.2. Erkenntnisse

Das Verfahren der Dynamischen Zonierung ist das Hauptergebnis dieser Arbeit. Sollen Schnellläuferstrategien eingesetzt werden, stellt die Dynamische Zonierung die Strategie der Wahl dar. Dies gilt besonders, wenn der Anteil kontinuierlich auszulagernder, dispositiver Bestände hoch ist.

Weiterhin wurden Grundlagen für die Vergleichbarkeit von Schnellläuferstrategien gelegt, indem Klassifikationskriterien für Schnellläuferstrategien herausgearbeitet wurden. Anhand

dieser Klassifikationskriterien konnten die Schnellläuferstrategien erstmals systematisiert werden.

Die lagereinheitsbasierte Betrachtungsweise, als korrekte Grundlage der Optimierung, wurde wieder aufgegriffen. Simulationsergebnisse zeigen die Überlegenheit dieser Betrachtungsweise. Die theoretische Herleitung des mit dieser Betrachtungsweise verbundenen Optimierungspotentials liefert die analytische Bestätigung der Simulationsergebnisse.

Auch praktisch besteht die Möglichkeit zur Bestimmung von lagereinheitsbasierten Verweildauern ohne Zusatzaufwände. Die Vorgehensweise zur Prognose solcher Verweildauern wurde beschrieben. Abschließend wurde ein Ansatz für die praktische Umsetzung der Verweildauerprognose vorgestellt, welcher die lagereinheitsbasierte Prognose integriert.

7.3. Offene Fragen

Weiterführende Untersuchungen sind in mehreren Bereichen sinnvoll. Der überraschend direkte Zusammenhang des Ungleichverteilungs-Parameters s mit dem Parameter a der sich bei den Verweildauern einstellenden Beta-Verteilung $B(a, 2)$ ist analytisch noch nicht bestätigt. Diesen Zusammenhang herzustellen, könnte weitere Erkenntnisse zu den zugrunde liegenden Zusammenhängen und vor allem deren Gültigkeitsgrenzen liefern.

Das größte Hindernis auf dem Weg zu einer gesamtheitlichen Betrachtung und Bewertung von Lagerstrategien besteht in der großen Anzahl von Einflussfaktoren und in der Schwierigkeit, diese zu darzustellen und zu verallgemeinern. Dies trifft ganz besonders auf die (empirische) Erfassung und Beschreibung praktisch auftretender Lagersortimente und -bewegungen zu. Diese Daten spiegeln jeden Geschäftsbetrieb so detailliert wider, dass erhebliche Vorbehalte gegenüber der Herausgabe solcher Information unvermeidlich sind. Es entsteht eine Situation, in der für praktische Planungsaufgaben und den operativen Betrieb diese Daten, eben wegen ihrer zentralen Bedeutung, regelmäßig zur Verfügung stehen, sie aber gleichzeitig nicht anderweitig verwendet werden dürfen. So bleibt Forschern auf diesem Gebiet nur, ihre begrenzten Projekterfahrungen und -daten zu anonymisieren und unter Verwendung von Hypothesen die Parameter zu vervollständigen. Diese müssen dann mit den ebenso entstandenen Erkenntnissen anderer Forscher ggf. aus anderen Fachgebieten verwoben werden. Das Ergebnis dieses Vorgangs kann nur begrenzt eine belastbare Basis für Forschungen bieten. Indiz für diesen Umstand sind einerseits derart restriktive Beschreibungen von Annahmen, dass die Übertragung der Forschungsergebnisse in die Praxis schwer fällt, oder andererseits nicht vollständig untermauerbare Thesen.

Eine Bibliothek anonymisierter, empirisch gewonnener Sortimente und Lagerbewegungen aus möglichst vielen Einsatzszenarien könnte in dieser Situation erhebliche Fortschritte ermöglichen. Es stünde ein über Spekulationen erhabenes, Annahmen nicht erforderndes Normal zur Verfügung, welches die vergleichende Bewertung von Lagerstrategien und Einsatzfällen stark vereinfacht. Auch die Identifikation und Bestimmung von Kennzahlen hätte geeignetere Grundlagen. Eine solche methodische Basis ist in anderen Fachgebieten in Form von sogenannten Panels etabliert. Für die Handhabung der großen Datenmengen stehen erstmals geeignete Werkzeuge und Speichermöglichkeiten zur Verfügung.

Untersuchungen zu Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Strategien, zur Leistungs-

7. Zusammenfassung und Ausblick

fähigkeit der Strategien und (Verweildauer-)Prognoseverfahren müssten so nicht in zumindest teilweise selbsterzeugten Umfeldern stattfinden. Die Übertragung von Ergebnissen auf die Praxis wäre einfacher und einfacher glaubhaft zu machen.

Die Bearbeitung der aufgezeigten Problemfelder wird dazu beitragen, Risiken bei Planung und Betrieb von Lagern zu vermindern und Lücken zwischen theoretischen Betrachtungen und praktischer Anwendung weiter zu schließen.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

AE	Artikeleinheit
COI	Cube-Per-Order-Index
CPO	Cube-Per-Order-Index
EOQ	Economic Order Quantities, Grundmodell der optimalen Bestellmenge
FIFO	First-In-First-Out
GV	Gleichverteilungsstrategie
I/O	Übergabe- / Übergabepunkt (Input-Output)
KFZ	Kürzeste-Fahrzeit-Strategie (engl. Closest-Open-Location)
LE	Lagereinheit
LVS	Lagerverwaltungssystem
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
WWS	Warenwirtschaftssystem
ZE	Zeiteinheit

Formelzeichen

α	Quantil
ξ_α	Quantilswert des α -Quantils
$b_s(i)$	Sicherheitsbestand des Artikels i
C_{max}	Summe der Artikelmaximalbestände
C_{LE}	Ladungsträgerkapazität
$D(i)$	Abgangs- oder Verbrauchsrate des Artikels i
f	Formfaktor des Lagers

7. Zusammenfassung und Ausblick

γ	Lager(-grenz-)leistung
i	Artikelindex
j	Verweildauerindex bzw. -perzentil
k	Lagerortindex bzw. Perzentil der Fahrzeitverteilung
K_G	Gesamtkosten
K_B	Bestellkosten
K_L	Lagerkosten
K	Quotient aus Lagerhaltungs- und Bestellkosten
L	(Lager-)Länge
$M(i)$	Nachfrage nach Artikel i im Planungszeitraum T
$m(i)$	Mittlere gelagerte Menge des Artikels i
N	Lagerkapazität
p	Wahrscheinlichkeit
$P(i)$	Zugangs- oder Produktionsrate
$Q(i)$	Optimale Losgröße des Artikels i
s	Ungleichverteilungsparameter
t_{VW}^*	Prognostizierte Verweildauer
T	Planungszeitraum
t_F	Fahrzeit

Literaturverzeichnis

- [AF04] ARNOLD, DIETER und KAI FURMANS: *Materialfluß in Logistiksystemen*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest, 4. Auflage, 2004.
- [AHBW02] ASHAYERI, J., R. M. HEUTS, M. BEEKHOF und M. R. WILHELM: *On The Determination Of Class-Based Storage Assignments In An AS/RS Having Two I/O Locations*. In: MILLER, R., G. D. TAYLOR, M. K. OGLE, J. USHER und B. A. PETERS (Herausgeber): *Progress in Material Handling Research*, Seiten 27–41. Material Handling Institute, Charlotte, NC, 2002.
- [AHV⁺01] ASHAYERI, J., R. M. HEUTS, M. W. T. VALKENBURG, H. C. VERAART und M. R. WILHELM: *A Geometrical Approach to Computing Expected Cycle Times for Class-Based Storage Layouts in AS/RS*. Tilburg University Discussion Paper (CentER), 57:1–32, August 2001.
- [AK85] APPELT, GERHARD und HORST KRAMPE: *Stückgutlagerung*. VEB Verlag Technik, Berlin, 1. Auflage, 1985.
- [AK90] APPELT, GERHARD und HORST KRAMPE: *Transport Umschlag Lagerung*. Wissensspeicher für Technologien. Fachbuchverlag Leipzig, 1990.
- [And29] ANDLER, K.: *Rationalisierung der Fabrikation und optimale Losgröße*. R. Oldenbourg, München, 1929.
- [Arn97] ARNOLD, DIETER: *Materialflußlehre*. Vieweg, 2. Auflage, 1997.
- [Aza89] AZADIVAR, F.: *Optimum allocation of resources between the random access and rack storage spaces in an automated warehousing system*. International Journal of Production Research, 27(1):119–139, 1989.
- [BBGR92] BLOECH, JÜRGEN, RONALD BOGASCHEFSKY, UWE GÖTZE und FOLKER ROLAND: *Einführung in die Produktion*. Physica, Heidelberg, 2. Auflage, 1992.
- [Bos98] BOSCH, KARL: *Statistik-Taschenbuch*. Oldenbourg, München, Wien, 3. Auflage, 1998.
- [Bra97] BRANDES, THORSTEN: *Betriebsstrategien für Materialflußsysteme unter besonderer Berücksichtigung automatisierter Lager*. Berichte aus der Betriebswirtschaft. Shaker, Aachen, 1997.

- [BS91] BRONSTEIN, I. N. und K. A. SEMENDJAJEW: *Taschenbuch der Mathematik*. Teubner, Nauka, Stuttgart, Leipzig, Moskau, 25. Auflage, 1991.
- [BT02] BAUMGARTEN, HELMUT und JACK THOMS: *Trends und Strategien in der Logistik: Supply Chains im Wandel*. Helmut Baumgarten, Technische Universität Berlin, 2002.
- [Bur80] BURDELKSI, THOMAS: *Univariable Zeitreihenanalyse und kurzfristige Prognose*. Hain, 1980.
- [CG96] CORMIER, GILLES und ELDON A. GUNN: *On coordinating warehouse sizing, leasing and inventory policy*. IIE Transactions, 28(2):149–154, 1996.
- [CG97] CHEN, LING-RONG und SUMIT GHOSH: *Modeling and Simulation of a Hierarchical, Distributed, Dynamic Inventory Management Scheme*. Simulation, 68:340–362, Jun 1997.
- [Cor97] CORMIER, GILLES: *A Brief Survey of Operations Research Models for Warehouse Design and Operation*. CORS-SCRO Bulletin, 31(3):15–20, August 1997.
- [CS91] CHOE, KYUNG-IL und GUNTER P. SHARP: *Small Parts Order Picking: Design and Operation*. Technischer Bericht MHRC-TR-89-07, Material Handling Research Center, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, Mai 1991.
- [EGM04] ELDEMIR, FAHRETTIN, ROBERT J. GRAVES und CHARLES J. MALMBORG: *New cycle time and space estimation for automated storage and retrieval system conceptualization*. International Journal of Production Research, 42(22):4767–4783, November 2004.
- [ER94] EYNAN, AMIT und MEIR J. ROSENBLATT: *Establishing Zones in Single-Command Class-Based Rectangular AS/RS*. IIE Transactions, 26(1):38–46, 1994.
- [FEM03] FEM: 9851: *Leistungsnachweis für Regalbediengeräte*. Technischer Bericht, FEM (Fédération Européenne de la Manutention), August 2003.
- [Fig00] FIGGENER, OLAF: *Studie Lagerverwaltungssysteme und ihr Leistungsprofil - Erste Ergebnisse*. f+h Fördern und Heben, 50(10), 2000.
- [Fis98] FISCHER, WOLFRAM: *Organisatorisch-technische Maßnahmen zur Lageroptimierung*. f+h Fördern und Heben, 48(10):734–736, 1998.
- [GAB⁺00] GOETSCHALCKX, MARC, MICHAEL M. AMIRHOSSEINI, DOUGLAS A. BODNER, T. GOVINDARAJ, LEON F. MCGINNIS und GUNTER P. SHARP: *Object Models and Design Databases for Warehouse Applications*. In: *Proceedings of the Industrial Engineering Solutions 2000 Conference*, Cleveland, OH, 2000.

- [GHS77] GRAVES, STEPHEN C., WARREN H. HAUSMAN und LEROY B. SCHWARZ: *Storage-retrieval interleaving in automatic warehousing systems*. Management Science, 23(9):935–945, Mai 1977.
- [Gin55] GINI, CORRADO: *Variabilità e mutabilità*. In: E. PIZETTI, T. SALVEMINI (Herausgeber): *Memorie di metodologica statistica*. Libreria Eredi Virgilio Veschi, Rome, 1912 (1955).
- [GM02] GLASS, MICHAEL und HANS-GEORG MARQUARDT: *Einsatz von Mehrfachlastaufnahmemitteln – Tourenbildung und Spielzeitberechnung*. In: KRAUSE, FRIEDRICH und PETER HORN (Herausgeber): *Kranautomatisierung – Komponentensicherheit im Einsatz*. 10. Internationale Kranfachtagung, Seite 283. LOGISCH - Gesellschaft für Logistik und innovative Schüttgutfördertechnik mbh, Juni 2002.
- [GMB⁺02] GOETSCHALCKX, MARC, LEON F. MCGINNIS, DOUGLAS A. BODNER, T. GOVINDARAJ, GUNTER P. SHARP und K. HUANG: *A Systematic Design Procedure for Small Parts Warehousing Systems Using Modular Drawer and Bin Shelving Systems*. In: *Progress in Material Handling Research*, Seiten 157–168. Material Handling Institute, Charlotte NC, 2002.
- [GN77] GRANGER, C. W. J. und P. NEWBOLD: *Forecasting Economic Time-Series*. Academic Press, New York, 1977.
- [GR90] GOETSCHLACKX, MARC und H. DONALD RATLIFF: *Shared Storage Policies based on the Duration Stay of Unit Loads*. Management Science, 36(9):1120–1131, September 1990.
- [Gra98] GRAVES, ROBERT J.: *A Review of Material Handling Research Publications*. In: *Proceedings of the 5th International Colloquium on Material Handling Research*. Material Handling Institute, Charlotte NC, Juni 1998.
- [Gro84] GROSSESCHALLAU, WERNER: *Materialflußrechnung*. Springer, Berlin, 1984.
- [Gro85] GRONAU, PAUL: *Beitrag zur Weiterentwicklung von Lagersystemen mit Hilfe neuer Förderzeugtechnologien*. Doktorarbeit, Technische Universität Berlin, 1985.
- [Gud72] GUDEHUS, TIMM: *Analyse des Schnellläufereffektes in Hochregallagern*. fördern + heben, 22(2):65–67, 1972.
- [Gud04a] GUDEHUS, TIMM: *Dynamische Disposition bei begrenzter Produktionsleistung - Teil 1*. f+h, (9):512–515, September 2004.
- [Gud04b] GUDEHUS, TIMM: *Fortschritte in der logistischen Auftragsabwicklung*. In: *Jahrbuch Logistik 2004*, Seiten 97–101. Jahrbuch Logistik, Korschbroich, 2004.

- [Gud05] GUDEHUS, TIMM: *Logistik: Grundlagen, Strategien, Anwendungen*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 3. Auflage, 2005.
- [Har13] HARRIS, F.: *How Many Parts to Make at Once*. Factory - The Magazine of Management, Seiten 135–152, 1913.
- [HDMS05] HERAGU, S. S., L. DU, R. J. MANTEL und P. C. SCHUUR: *Mathematical model for warehouse design and product allocation*. International Journal of Production Research, 43(2):327–338, Januar 2005.
- [Hes63] HESKETT, J. L.: *Cube-per-order index: A key to warehouse stock location*. Transportation and Distribution Management, 4:27–31, 1963.
- [Hes64] HESKETT, J. L.: *Putting the cube-per-order index to work in warehouse layout*. Transportation and Distribution Management, 4:23–30, 1964.
- [HLP52] HARDY, GODFREY H., JOHN E. LITTLEWOOD und GEORGE POLYA: *Inequalities*. University Press, Cambridge, 2. Auflage, 1952.
- [HR90] HACKMAN, STEVEN T. und MEIR J. ROSENBLATT: *Allocating Items to an Automated Storage and Retrieval System*. IIE Transactions, 22(1):7–14, März 1990.
- [HS03] HÄRDLE, WOLFGANG und LEOPOLD SIMAR: *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Springer, New York, 2003.
- [HSG76] HAUSMAN, W. H., L. B. SCHWARZ und S. C. GRAVES: *Optimal storage assignment in automatic warehousing systems*. Management Science, 22(6):629–638, Februar 1976.
- [JM91] JARVIS, JAY M. und EDWARD D. MCDOWELL: *Optimal Product Layout in an Order Picking Warehouse*. IIE Transactions, 23(1):93–101, März 1991.
- [JS99] JÜNEMANN, REINHARDT und THORSTEN SCHMIDT: *Materialflußsysteme - Systemtechnische Grundlagen*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur, Tokio, 2. Auflage, 1999.
- [Kal78] KALLINA, CARL: *Development and Implementation of a Simple Short Range Forecasting Model*. INTERFACES, 8(3):32–41, 1978.
- [Ken53] KENDALL, DAVID GEORGE: *Stochastic Processes Occurring in the Theory of Queues and Their Analysis by the Method of Imbedded Markov Chain*. American Mathematical Statistics, 24:338–354, 1953.
- [KL76] KALLINA, CARL und JEFFREY LYNN: *Application of the Cube-per-Order Index Rule*. Interfaces, 7(1):37–46, November 1976.
- [Kle75] KLEINROCK, LEONARD: *Queueing Systems, Band 1: Theory*. John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, 1975.

- [KOSB99] KULTUREL, SADAN, NUR E. OZDEMIREL, CANAN SEPIL und ZAFER BOZKURT: *Experimental Investigation of Shared Storage Assignment Policies in Automated Storage/Retrieval Systems*. IIE Transactions, 31(8):739–749, August 1999.
- [KP95] KOUVELIS, P. und VASSILIS-GEORGE PAPANICOLAOU: *Explicit Formulas for the Optimal Boundaries of a Two-Class-Based Automated Storage/Retrieval System*. International Journal of Production Research, 33(10):2889–2905, 1995.
- [Kri05] KRIEG, GEORG: *Neue Erkenntnisse zu Andlers Losgrößenformel*. Arbeitspapier, Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt, 2005.
- [LBA01] LIPPOLD, CHRISTIAN R., STEFFEN BLUNCK und DIETER ARNOLD: *Schnellläuferzonen in Hochregallagern*. f+h Fördern und Heben, 51(1-2):38–40, 2001.
- [Lee92] LEE, MOON-KYU: *A storage assignment policy in a man-on-board automated storage/retrieval system*. International Journal of Production Research, 30(10):2281–2292, 1992.
- [Lip03] LIPPOLD, CHRISTIAN: *Spielzeiten in Hochregallagern mit doppelttiefer Lagerung*. Doktorarbeit, Universität Karlsruhe, Mai 2003.
- [Lit61] LITTLE, J. D. C.: *A Proof for the Queueing Formula $L = \lambda \cdot W$* . Operations Research, 9(3):383–387, 1961.
- [LMK97] LARSON, T. NICK, HEATHER MARCH und ANDREW KUSIAK: *A heuristic approach to warehouse layout with class based storage*. IIE Transactions, 29(4):337–348, 1997.
- [Log98] LOGISTIK, VDI-GESELLSCHAFT FÖRDERTECHNIK MATERIALFLUSS: *VDI-Richtlinie 4480 Blatt 1: Durchsatz von automatischen Lagern mit gassengebundenen Regalbediensystemen*. Technischer Bericht, VDI (Verein Deutscher Ingenieure), Februar 1998.
- [Lor05] LORENZ, MAX OTTO: *Methods of measuring the concentration of wealth*. Publications of the American Statistical Association, (9):209–219, 1905.
- [Luc86] LUCKE, HANS-JOACHIM: *Strategien der dispositiven Steuerung flächenüberstreichender Transportsysteme bei der Entwicklung zur automatisierten Fabrik*. Doktorarbeit, Technische Universität Dresden, 1986.
- [LW84] LINN, RICHARD J. und RICHARD A. WYSK: *A Simulation Model for Evaluating Control Algorithms of an Automated Storage and Retrieval System*. In: *Proceedings of the 1984 Winter Simulation Conference*, San Diego, Dallas 1984. Society for Computer Simulation.
- [LW87] LINN, RICHARD J. und RICHARD A. WYSK: *An Analysis of Control Strategies for an Automated Storage/Retrieval System*. INFOR, 25(1), 1987.

- [Mal96] MALMBORG, CHARLES J.: *Storage assignment policy tradeoffs*. International Journal of Production Research, 34(2):363–378, 1996.
- [Mer94] MERTENS, PETER: *Prognoserechnung*. Physica, Heidelberg, 5. Auflage, 1994.
- [MF72] MALLETT, A. J. und R. L. FRANCIS: *A generalized assignment approach to optimal facility layout*. AIIE Transactions, 4(2):144–147, 1972.
- [MK87] MALMBORG, CHARLES J. und BHASKARAN KRISHNAKUMAR: *On the Optimality of the Cube per Order Index for Conventional Warehouses with Dual Command Cycles*. Material Flow, 4:169–175, 1987.
- [MM97] MELLER, R. D. und A. MUNGWATTANA: *Multi-shuttle automated storage/retrieval systems*. IIE Transactions, 29:925–938, 1997.
- [MYP01] MOON, GEEJU, SANG-SEOB YOON und SANG-GEUN PARK: *Improvement of AS/RS Performance Using a Common Zone for Demand Variation*. In: *The 29th International Conference: Computers and Industrial Engineering*, Seiten 51–55, Montreal, November 2001.
- [Nad78] NADDOR, ELIEZER: *Sensitivity to Distributions in Inventory Systems*. Management Science, 24(16):1769–1772, Dezember 1978.
- [Nah97] NAHMIA, STEVEN: *Production and Operations Analysis*. McGraw-Hill, 3. Auflage, 1997.
- [OR04] OSER, JÖRG und MARIO RITONJA: *Expected Cycle Time in a Class-Based Single- and Double Deep Storage System*. 8. International Material Handling Research Colloquium Graz, 13.06.-17.06.2004 Graz 2004.
- [PFWF03] PARK, BYUNG CHUN, ROBERT D. FOWLEY, JOHN A. WHITE und EDWARD H. FRAZELLE: *Dual command travel times and miniload system throughput with turnover based storage*. IIE Transactions, 35:343–355, 2003.
- [Pre79] PRETTENTHALER, SEPP: *Auswirkungen von Schnellläuferzonen auf die RFZ-Spielzeiten*. f+h Fördern und Heben, 29(7):634–635, 1979.
- [RE89] ROSENBLATT, MEIR J. und AMIT EYNAN: *Deriving the optimal boundaries for class-based automatic storage/retrieval systems*. Management Science, 35(12):1519–1524, Dezember 1989.
- [RR84] ROSENBLATT, MEIR J. und YAAKOV ROLL: *Warehouse design with storage policy considerations*. International Journal of Production Research, 22(5):809–821, 1984.
- [SB95] SARKER, B. R. und P. S. BABU: *Travel time models in automated storage/retrieval systems: A critical review*. International Journal of Production Economics, 40:173–184, 1995.

- [Sch00] SCHULZE, FRANK: *Neue Methoden zur Modellbildung für die Planung und Steuerung von Materialflußsystemen*. Doktorarbeit, Technische Universität Dresden, 2000.
- [See05] SEEMÜLLER, STEFAN: *Durchsatzberechnung automatischer Kleinteilelager im Umfeld des elektronischen Handels*. Doktorarbeit, Technische Universität München, 2005.
- [SGH78] SCHWARZ, LEROY B., STEPHEN C. GRAVES und WARREN H. HAUSMAN: *Scheduling policies for automatic warehousing systems: simulation results*. AIIE Transactions, 10:260–270, 3 1978.
- [SJDS94] SARKER, BHABA R., LAWRENCE MANN JR. und JOSE R. G. LEAL DOS SANTOS: *Evaluation of a class-based storage scheduling technique applied to dual-shuttle automated storage and retrieval systems*. Production Planning & Control, 5(5):442–449, 1994.
- [SK08] STADTLER, HARTMUT und CHRISTOPH KILGER: *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Springer, 4. Auflage, 2008.
- [SPP98] SILVER, EDWARD A., DAVID F. PYKE und REIN PETERSON: *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*. John Wiley & Sons, New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, 3. Auflage, 1998.
- [tHW01] HOMPEL, MICHAEL TEN und REINER WESSELOWSKI: *Nicht ohne Einfluss und Folgen*. f+h Fördern und Heben, 51(3), 2001.
- [vdB96] BERG, JEROEN P. VAN DEN: *Class-based storage allocation in a single-command warehouse with space-constraints*. International Journal of Industrial Engineering, 3(1):21–28, 1996.
- [vdB99] BERG, JEROEN P. VAN DEN: *A literature survey on Planning and control of warehousing systems*. IIE Transactions, 31:751–762, 1999.
- [vdBG00] BERG, JEROEN P. VAN DEN und A. J. R. M. GADEMANN: *Simulation study of an automated storage/retrieval system*. International Journal of Production Research, 38(6):1339–1356, 2000.
- [WCC01] WEN, U. P., D. T. CHANG und S. P. CHEN: *The impact of acceleration/deceleration on travel-time models in class-based automated S/R systems*. IIE Transactions, 33:599–608, 2001.
- [Wöh90] WÖHE, GÜNTER: *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. Vahles Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. Verlag Franz Vahlen, 17. Auflage, 1990.

A. Betaverteilungen

A. Betaverteilungen

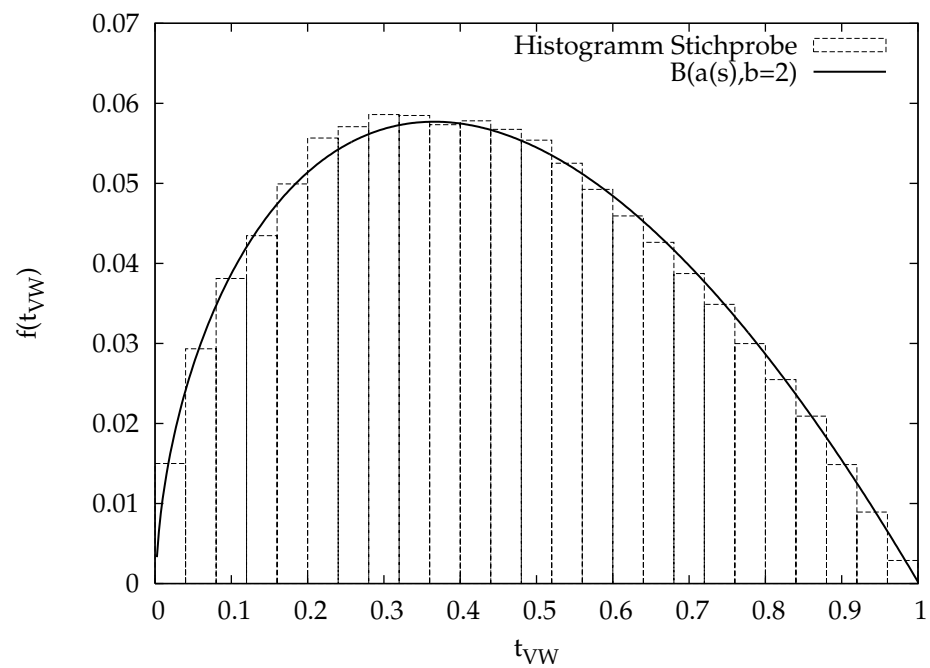


Abbildung A.1.: Verweildauerverteilung 20/60, $s = 0.318$

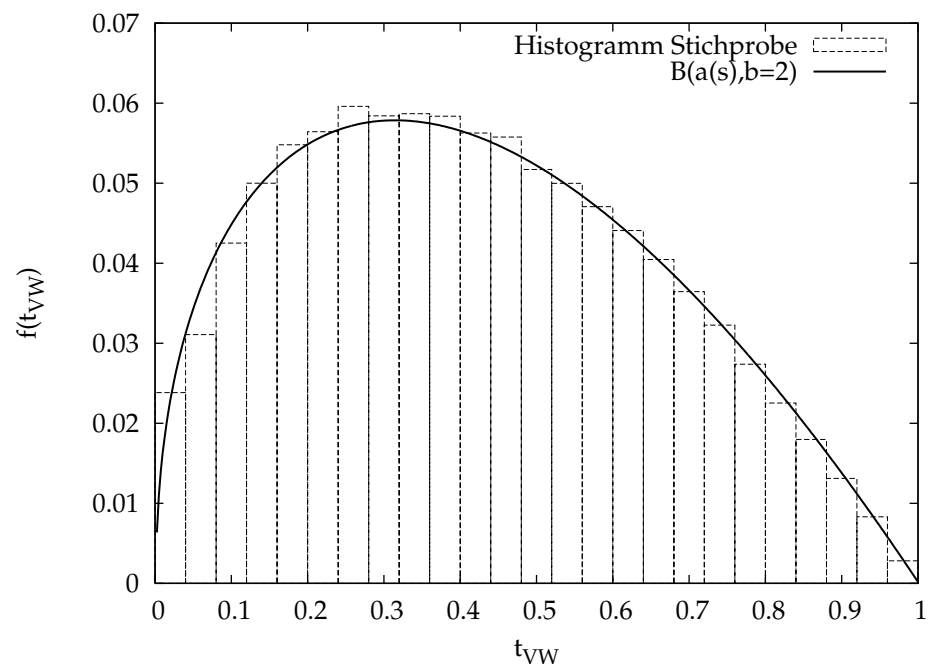


Abbildung A.2.: Verweildauerverteilung 20/65, $s = 0.268$

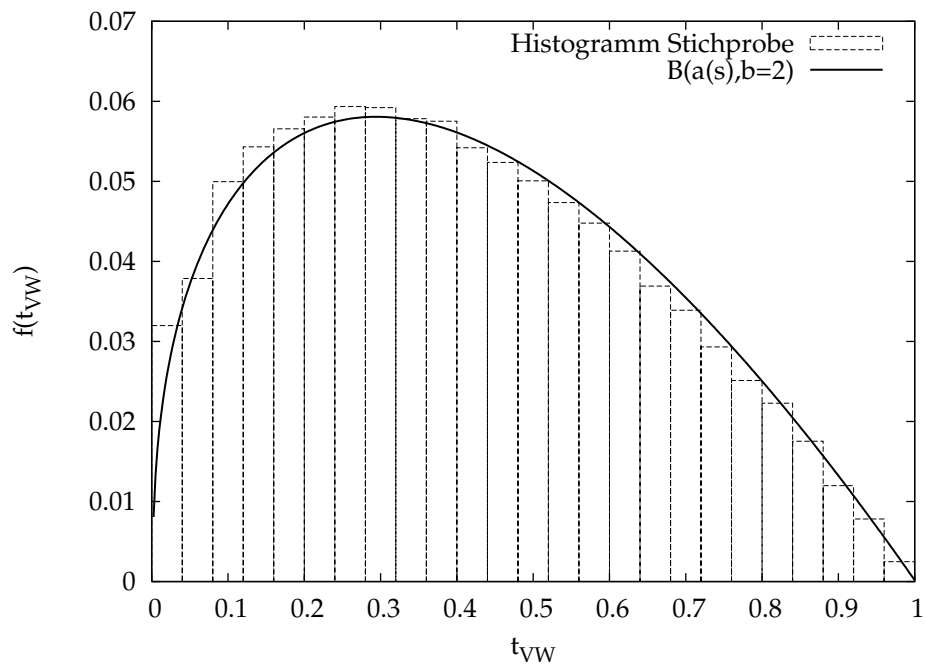


Abbildung A.3.: Verweildauerverteilung 20/70, $s = 0.222$

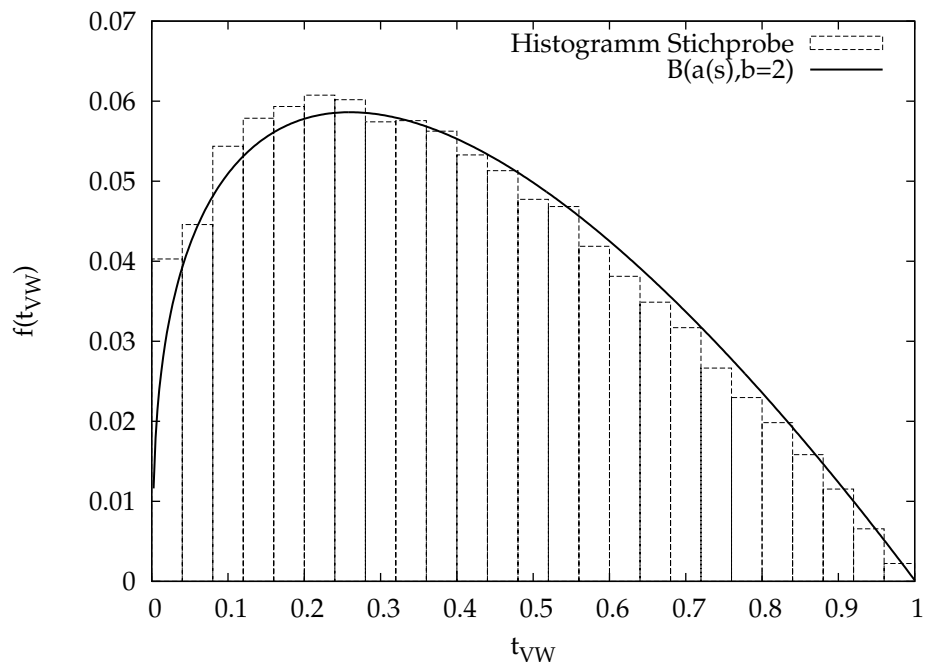


Abbildung A.4.: Verweildauerverteilung 20/75, $s = 0.179$

A. Betaverteilungen

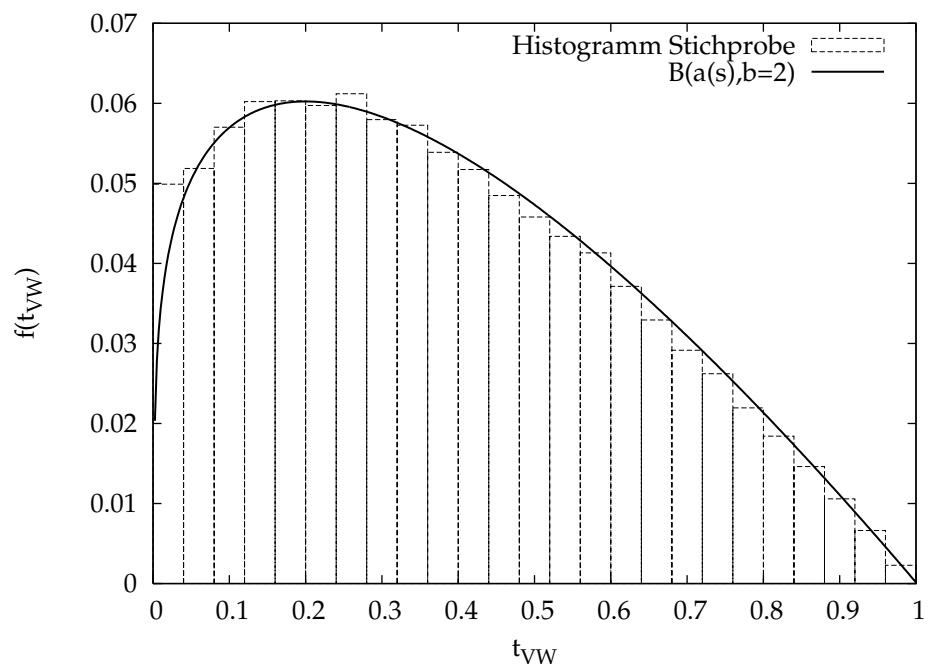


Abbildung A.5.: Verweildauerverteilung 20/80, $s = 0.139$

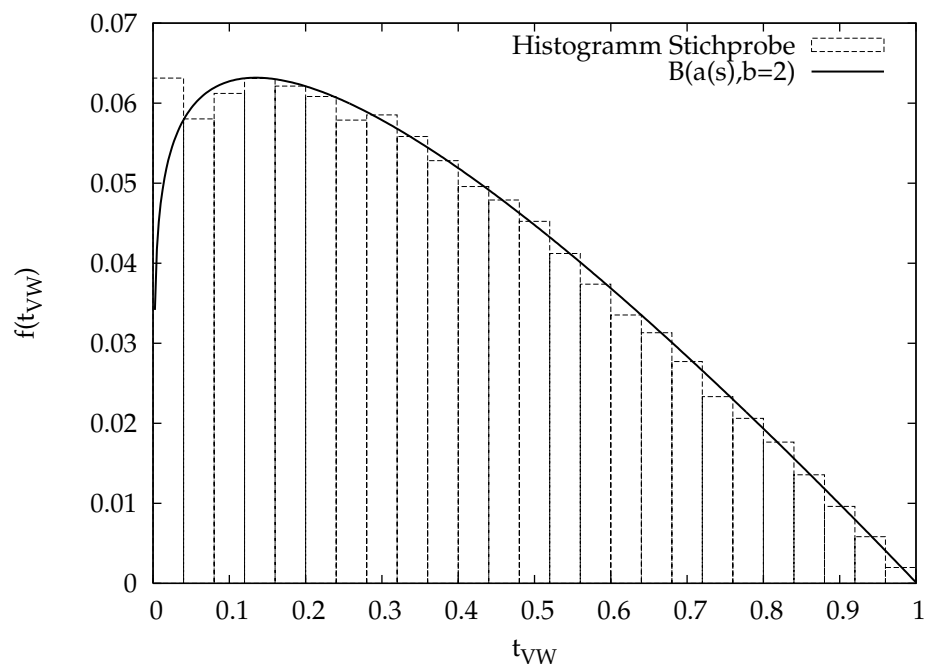


Abbildung A.6.: Verweildauerverteilung 20/85, $s = 0.101$

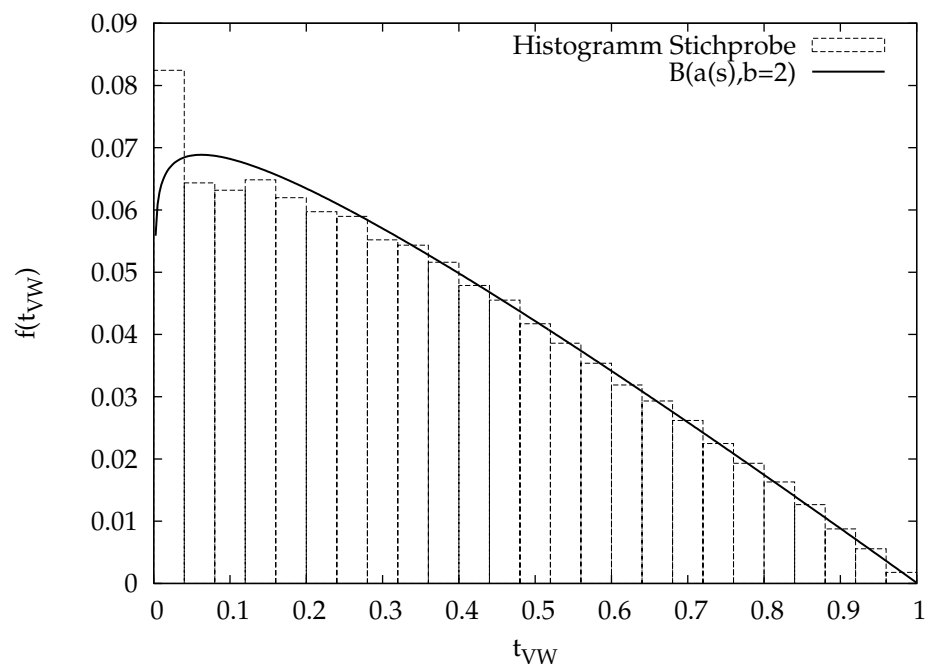


Abbildung A.7.: Verweildauerverteilung 20/90, $s = 0.065$